

f i z i s®

1979
april

24

STUDENTSKI STRUČNI
ČASOPIS IZ FIZIKE





STUDENTSKI ČASOPIS U FIZIKE - STUDENT JOURNAL OF PHYSICS

Ovaj broj časopisa FIZIS odštampan je zahvaljujući i materijalnoj pomoći Odseka za fizičke i meteorološke nauke PMF-a, Beograd, i Instituta za fiziku SRS, na čemu redakcija srdečno zahvaljuje.

R E D A K C I J A

Milan Džambazovski

Institut za fiziku Prirodno-matematičkog fakulteta
u BeograduMaja Marinković Jasna Maslarević
Studenti Odseka za fizičke i meteorološke nauke PMF-a, Beograd

Glavni i odgovorni urednik

Jablan R. Dojčilović (odsutan)

Zamenik glavnog i odgovornog urednika

Petar V. Vidaković

Institut za fiziku Prirodno-matematičkog fakulteta u Beogradu

TEHNIČKA OBRADA

Zoran Nenić - glavni tehnički urednik

DISTRIBUCIJA

Kljajić Slobodan

Časopis izlazi četiri puta godišnje. Cena po primerku je 20 dinara (za studente i učenike 10 din.). Tiraž 250 primeraka.

Rukopise i preplate slati na adresu Institut za fiziku PMF-a, Beograd, Studentski trg 16, poštanski fah 550, sa naznakom - za FIZIS. Godišnja preplata je 80 din. (40 din.). Žiro račun broj 60806 - 603 - 14862, sa naznakom za FIZIS. Rukopisi se ne vraćaju i ne honorisu.

IZ ISTORIJE FIZIKE (IDEJE I ZABLUDUDE)

"Put nauke je retko kada prav, kao što to misle laici. Njegove stranputice su veoma ljudske i važnu ulogu u njima igraju ljudi i kulturne tradicije" (WATSON: "Dvostruka helikoida")

KAKO JE NASTALA SPECIJALNA TEORIJA RELATIVNOSTI ?

Rak Lajoš - Institut za Fiziku PMF

U javnosti je rasprostranjeno mišljenje, da je teorija relativnosti delo samo jednog jedinog čoveka, Einsteina. Ovo nalazimo i u nekim udžbenicima fizike. Čitajući Einsteinov osnovni članak ("O elektrodinamici tela u kretanju", 1905.) stičemo utisak da je takvo mišljenje opravdano, pošto nigde u njemu ne nalazimo pozivanje na druge radove. Nameće se prirodno pitanje: zašto onda najvažniji rezultat članka (transformacioni obrazci koordinata), nosi Lorentzovo ime? Postoji i dijametralno suprotno mišljenje, da je Einstein napisao članak u kome izlaže teoriju relativnosti Lorentza i Poincaréa sa neznatnim dopunama. Istina je negde u sredini. Teorija relativnosti je delo nekoliko fizičara, a ko je šta uradio, pokušaćemo da odgovorimo u ovom članku.

WALDEMAR VOIGT (1850-1910) je 1887. godine ispitivao kakva veza mora postojati izmedju koordinata pokretnog i nepokretnog sistema da se brzina svetlosti ne bi promenila pri prelasku iz jednog sistema u drugi. U tom cilju napustio je dotada

neprikošnovenu koncepciju apsolutnog vremena i prvi je transformisao vreme! Izložimo ukratko njegove ideje:

Brzina prostiranja svetlosti u nepokretnom etru opisana je talasnom jednačinom:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} \quad \psi = \psi(x, y, z, t) \quad \dots(1)$$

Eksperiment pokazuje da je prostiranje svetlosti u odnosu na pokretan etar opisano istom diferencijalnom jednačinom (napomenimo da je Michelson svoj čuveni eksperiment izvršio 1881. a modifikovanu verziju u saradnji sa Morleyem uradio iste 1887. godine). Neka se sistem K' kreće duž x -ose brzinom v u odnosu na sistem K . Vezu izmedju K i K' daju Galilejeve transformacije:

$$\begin{aligned} x' &= x - vt & x &= x' + vt \\ y' &= y & y &= y' \\ z' &= z & z &= z' \end{aligned} \quad \dots(2)$$

Zamenom relacija (2) u (1) i uvezši u obzir $t = t'$ (ovo je u to vreme smatrano sama po sebi jasnim, tako da nigde eksplicitno nije ni napisano!), dobijamo jednačinu:

$$\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) \frac{\partial^2 \psi}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y'^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z'^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t'^2} + \frac{v^2}{c^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x'^2} \quad \dots(3)$$

koja opisuje prostiranje svetlosti u sistemu K' . Iz jednačine (3) sledi da brzina svetlosti u K' zavisi od brzine sistema K' u odnosu na etar. Pošto je to u protivrečnosti sa eksperimentalno opaženim, Galilejeve transformacije ne opisuju realnu situaciju. Voigt je uočio da ako umesto Galilejevih transformacija primenjuje transformacije:

$$\begin{aligned} x' &= x - vt \\ y' &= y \sqrt{1 - \beta^2} \\ z' &= z \sqrt{1 - \beta^2} \\ t' &= t - \frac{v}{c^2} x \end{aligned} \quad \beta = \frac{v}{c} \quad \dots(4)$$

onda jednačina (1) prelazi u:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y'^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z'^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t'^2} \quad \psi = \psi(x', y', z', t') \quad \dots(5)$$

Ova je istog oblika kao i jednačina (1), iz čega sledi da se svetlost u sistemu K' prostire istom brzinom kao i u sistemu K . Lorentzove transformacije se dobiju ako se desne strane relacija (4) podeli sa $\sqrt{1 - \beta^2}$. Voigt je dakle našao transformacione obrasce, koji ne menjaju oblik talasne jednačine. Da bi to postigao morao je napustiti do tada "jasnu" relaciju $t = t'$; i to je prvi slučaj u istoriji fizike da je neko posumnjavao u realnost pojma apsolutnog vremena. Nedostatak transformacija (4) je u tome što ako izrazimo x , y , z , t u funkciji x' , y' , z' , t' dobijamo obrasce različitog oblika od (4), što znači da mora postojati neki naročiti koordinatni sistem (etar), koji apsolutno miruje. Fizičari su skoro dvadeset godina smatrali da je tok fizičkih procesa određen apsolutnim vremenom, koje se meri u sistemu K_0 , a transformirano (lokalno) vreme t' , koje je samo neka vrsta računske veličine (bez ikakvog fizičkog smisla), se zbog nekih razloga razlikuje od ovog.

Rad Voigta je ostao praktično nezapažen i nije imao nekog naročitog uticaja na dalji razvoj teorije relativnosti.

LORENTZ (1853-1928) je od 1892. godine negativan rezultat Michelson-Morleyevog eksperimenta objašnjavao kontraktivnom hipotezom (ovu hipotezu istovremeno je publikovao i FITZ-GERALD (1851-1901)). Prema toj hipotezi dužina štapova, kao rezultat interakcije izmedju etra i štapa, smanjuje se za $1/\sqrt{1 - \beta^2}$. Pri daljoj razradi svoje teorije, Lorentz je 1899. godine našao prave transformacione obrasce prostornih koordinata. Iako je dao pogrešnu formulu za transformaciju vremena, ipak je došao do zaključka da treba transformisati i vreme.

O sinhronizaciji časovnika (što se može naći u uvodnom delu bilo koje knjige o teoriji relativnosti) prvi je govorio

POINCARÉ (1854-1912), godinu dana pre objavljivanja često spominjanog Einsteinovog rada. Poincaré je 1904. godine održao jedno predavanje u ST. Louisu za obrazovane laike, iz kojeg ćemo citirati nekoliko originalnih ideja:

"... Sada ću preći na Lavoisierov princip održanja materije: uistinu ne možemo ga razmatrati, a da ne pretumbamo celu mehaniku.

Postoje danas ljudi, koji smatraju da se on čini istinit, zbog toga što u mehanici u obzir uzimamo samo male brzine, a prestao bi da važi, za tela koja se kreću brzinom uporedivom sa brzinom svetlosti.

Iz ovih rezultata, ako budu potvrđeni, nastaje sasvim nova mehanika, koju bi pre svega karakterisala činjenica, da ni jedna brzina ne bi mogla premašiti brzinu svetlosti..., sva tela bi se sa sve većom inercijom suprostavljali silama koje ih pokušavaju ubrzavati; i ova inercija bi postala beskonačna, kada bi se približavali brzini svetlosti.

Masa ima dva aspekta, istovremeno se pojavljuje kao karakteristika inertnosti, i kao faktor koji u Newtonovom zakonu gravitacije igra ulogu mase koja privlači. Ako nije stalna kao karakteristika inertnosti može li biti stalna kao gravitaciona masa ?..."

Lorentz je 1904. izložio svoj najznačajniji rad pred Akademijom u Amsterdamu. U ovom radu naveo je kompletne transformacije, uključujući i ispravne transformacije vremena koja danas nose njegovo ime:

$$\begin{aligned}
 x' &= \frac{x-vt}{\sqrt{1-\beta^2}} & x &= \frac{x'+vt}{\sqrt{1-\beta^2}} \\
 y' &= y & y &= y' \\
 z' &= z & z &= z' \\
 t' &= \frac{t - \frac{x}{c^2}v}{\sqrt{1-\beta^2}} & t &= \frac{t' + \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1+\beta^2}}
 \end{aligned}
 \quad \dots(6)$$

Lorentz je do kraja života zastupao ideju da treba zadržati pojmove apsolutnog prostora i vremena, a lokalno vreme

je smatrao matematičkom veličinom, bez dubljeg sadržaja, kao nužno zlo za razumevanje fizičkih pojava.

Godine 1906. Poincaré je prvi primetio da Lorentzove transformacije imaju osobinu grupe, i da veličina $x^2+y^2+z^2-c^2t^2$ ostavlja invarijentnom, i da se mogu smatrati rotacijama u četvorodimenzionom prostoru x, y, z i ct . Dao je pravila transformacija niza fizičkih veličina: gustine nanelektrisanja, gustine struja, skalarnog i vektorskog potencijala itd.. U ovom radu se u suštini nalazi kompletan matematički aparat teorije relativnosti. Mnoge rezultate koje nalazimo kod njega, Minkowski razrađuje sistematičnije tek dve godine kasnije (1908).

A šta je zapravo uradio Einstein? Najbolje da citiramo jedno njegovo pismo, koje je napisao Seeligu:

"...Lorentzov osnovni rad iz 1895. godine bio mi je poznat, međutim njegove kasnije radove i Poincaréova ispitivanja u vezi sa tim nisam poznavao. Moj rad je u ovom smislu bio originalan. Novost je u sledećem. Lorentzove transformacije nisam izveo iz elektrodinamike, nego iz sasvim opštih razmatranja..."

Lorentz nije prihvatio Einsteinovu interpretaciju i vrlo rado je govorio o "Einsteinoj teoriji relativnosti". Poincaréovo shvatanje je blisko Einsteinovom, a na jednom predavanju o teoriji relativnosti koje je održao 1909. u Göttingenu čak nije ni spomenuo Einsteinovo ime.

KAKO JE PRIPREMLJEN TEREN ZA OPŠTU TEORIJU RELATIVNOSTI

U istoriji nauke ima bezbroj primera, da se ni jedna revolucionarno nova teorija nije mogla razviti, ako naučna javnost nije bila dobro pripremljena, da prihvati nove ideje. Dok jedna teorija dospe i u udžbenike, mora da prodje duže vreme, a "konačan oblik teorije" je rezultat rada više naučnika. Ideja da postoji veza između rasporeda mase i strukture prostora pojavila se sto godina pre Einsteina. Einsteinov doprinos (i to ne malii)

je što je uspeo naći konkretnе matematičke jednačine koje povezuju metriku prostora sa raspodelom masa. Mi ćemo dati kratak osvrt na razvoj teorije prostora do Einsteina.

Početkom XIX veka u radovima Bolyaija, Gaussa i Lobachevskog je dovedeno u pitanje važenje aksioma Euklidove geometrije. Oni su smatrali da se istinitost aksioma geometrije može (i treba) proveravati merenjem. Gauss je razvio svoju teoriju o tzv. unutrašnjoj geometriji zakrivljenih površi (ispitivao je one osobine dvodimenzionalnih površi, koje su nezavisne od osobina trodimenzionalnog prostora u kome se nalazi površ), polazeći od prakse geometara. Gaussovi rezultati se vrlo često navode u popularnim knjigama o opštoj teoriji relativnosti,



slika 1. "Dvodimenzionalna bića" određuju zakrivljenost prostora predstava zakrivljenog prostora, navodi se primer inteligentnih "dvodimenzionalnih bića", koja žive na dvodimenzionalnoj površi. Ova bića ne znaju za treću dimenziju, ali merenjima mogu doći do zaključka o zakrivljenosti svog prostora. Treba da izmere samo uglove u trouglu. Ako je njihov zbir 180° žive na ravni, ako je veći od toga površ ima pozitivnu, ako je manji površ ima negativnu zakrivljenost (vidi sl)

Riemann je uopštavajući Gaussov rad o neeuclidskoj geometriji 1854. godine dao obrazac za rastojanje izmedju dve bliske tačke u n-dimenzionom zakrivljenom prostoru:

$$ds^2 = \sum_{\mu\nu} g_{\mu\nu} dx_\mu dx_\nu \quad \dots(7)$$

($g_{\mu\nu}$ je tzv. metrički tenzor) što u stvari predstavlja uopštavanje Pythagorine teoreme u trodimenzionalnom Euklidovom prostoru:

$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 \quad \dots(8)$$

U svojoj knjizi: "Über die Hypothesen, welche der

Geometrie zu Grunde liegen" Riemann daje vrlo interesantnu ideju o prirodi metričkog tenzora:

"...one osobine, koje prostor reslikuje od drugih zemislih skupova, mogu da se odrede samo iz eksperimenta. Ovde se nameće problem, da otkrijemo najosnovnije činjenice, pomoću kojih se mogu odrediti osnovne metričke relacije prostora... Ove činjenice - kao i ma koja činjenica - imaju samo empirijsku sigurnost i nisu nužne..., osnovu metričke relacije treba trakti spolja u silama veze, koje deluju na njega..."

Međutim to nas vodi na područje druge nauke, fizike."

Prevodilac Riemannovog rada na engleski Clifford, u svojoj knjizi: "On Space-theory of Matter" (1876) konkretniše svoju intuitivnu ideju da je zakrivljenost prostora povezana sa raspodelom materije u njemu:

"Riemann je pokazao da postoje razne vrste linija i različite površi, tako da postoje trodimenzionalni prostori različitih vrsta; samo putem eksperimenta možemo odrediti, kojoj vrsti pripada prostor u kome živimo. Konkretno, aksiome geometrije u ravni važe samo u onim eksperimentima, koja vršimo na površini jedne harlige; međutim znamo da je list u stvari prekriven malim ispuštenjima i udubljenjima, za koja (pošto je njihova ukupna zakrivljenost različita od nule) ovi aksiomi ne važe..."

Želeo bih pokazati, kao bi se ove spekulacije mogle primeniti na istraživanje fizičkih procesa. Ja naime smatram:

1) Da su mali delovi prostora u stvari iste prirode kao i mala brda, na površi koja je u proseku ravna; tj. da obični zakoni geometrije ne važe na njima.

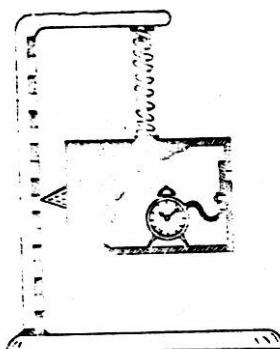
2) Da ova zakrivljenost ili deformisanost kontinuirano prelazi iz jednog dela prostora u drugi, kao talas.

3) Da se ova promena zakrivljenosti stvarno odigra u pojavama, koja nazivamo kretanjem materije..."

EINSTEIN I RELACIJE NEODREDJENOSTI

Einstein, mada ima ogromnih zasluga u postavljanju kvantne teorije, nije prihvatao njenu statističku interpretaciju. Njegova izreka: "da se bog ne zabavlja bacanjem kockica" postala je poslovična. Uprkos opozicionističkom stavu, imao je važnu ulogu u raščišćavanju osnovnih pojmoveva. Veoma je poučna njegova diskusija o relaciji neodredjenosti energije i vremena, koju je vodio sa Bohrom. Šta se zapravo dogodilo, najbolje da ispriča jedan od aktivnih učesnika diskusije G. Gamow :

"Mnogi su fizičari lako prihvatali nove ideje. Drugima se nimalo nisu dopale. Jedan od njih bio je i Albert Einstein. Njegovo determinističko filozofsko ubedjenje ga je sprečilo, da prihvati princip neodredjenosti. Kao što su skeptici tražili protivurečnost u njegovoj teoriji relativnosti, Einstein je pokušavao da nadje protivurečnost u principu neodredjenosti kvantne fizike. Njegovi su pokušaji na kraju čak potvrdili princip neodredjenosti. Dogadjaj koji se desio u Brislu 1930. godine na Šestom međunarodnom Solvayovom kongresu za fiziku ilustruje to na zanimljiv način.



slika 2. Uredjaj iz Einstein-Einstein je u prisustvu Bohra, Bohrovog misaonog eksperim.

vršio "misaoni eksperiment".

Vreme je četvrta koordinata prostor-vremena, rekao je on. Energija je četvrta komponenta četvoro impulsa (mase,brzine), tako da Heisenbergova relacija mora povezati neodredjenost vremena sa neodredjenošću energije, tj. proizvod ove dve veličine mora biti veći ili jednak Planckovoj konstanti \hbar .

Einstein je htio da pokaže da to nije tako - da se energija i vreme mogu meriti istovremeno bez neodredjenosti. Uzmimo rekao je, jednu idealnu kutiju obloženu savršenim ogledalima sa unutrašnje strane, koja može zračnu energiju čuvati beskonačno dugo. Izmerimo kutiju. Nešto kasnije, u određenom trenutku satni mehanizam, sličan tempirnoj bombi, otvorice preklopna vrata kutije, da bi izašla izvesna količina svetlosti. Izmerimo ponovo težinu kutije. Promena mase će dati informaciju o energiji svetlosti, koja se izašla. Na taj način, rekao je Einstein, možemo izmeriti ispuštenu energiju i trenutak ispuštanja, proizvoljno tačno, što je u suprotnosti sa principom neodredjenosti.

Sutradan pre podne Bohr je posle besane noći zadao smrtonosni udarac Einsteinovoj ideji. Naveo je misaoni eksperiment, u kome takodje postoji idealan uredjaj.¹⁾ Bohr je počeo sa merenjem težine Einsteinove kutije. Vaga sa oprugom, snabdevena kazaljkom za očitavanje težine na skali, pričvršćenog na vertikalni stub potpuno odgovara ovoj svrsi, rekao je Bohr. Sada, pošto se kutija, pri promeni težine, kreće vertikalno, imaće neodredjenu vertikalnu brzinu, a zbog toga će i njena visina iznad stola biti takodje neodredjena, nastavio je on. Dalje, zbog neodredjenosti izmerene visine iznad površine Zemlje sledi i neodredjenost kretanja časovnika, pošto prema teoriji relativnosti, kretanje časovnika zavisi od njegovog položaja u gravitacionom polju. Bohr je pokazao da izmedju neodredjenosti vremena i promene mase postoji upravo ona veza, koju je Einstein htio opovrgnuti.

Einstein je pobedjen sopstvenim argumentima, priznao da Bohr-Heisenbergove shvatanje ne sadrži unutrašnju protivurečnost, ali ni do kraja života nije prihvatio relacije neodredjenosti i nudio se da će se fizika vratiti na determinističko shvatanje."

1) Model ovog uredjaja kasnije je zaista napravio od drveta, G. Gamow, Bohrov učenik u to vreme, i dao ga Bohru da ga koristi pri svojim predavanjima! (vidi sl.2.)

KVANTNA MEHANIKA I NJENE INTERPRETACIJE

T.A.Brody, R. Cid, J.L. Jiménez, Decio Levi, J.R.Kartínez,
P. Pereyra, R. Rechtman i M. Rosales

I UVOD

"Nauka ne postiže nikakav napredak, a da ga filozofija
ne potvrdi i utvrdi."

Th. Mann

"Kursevi kvantne mehanike prouzrokuju kod mnogih studenata
jednu mračnu nelagodnost. Dyson (1958) to opisuje ovako:

Student započinje sa učenjem veštine zanata... Kasnije počinje da se brine, jer ne razume šta radi. Ovaj period traje šest meseci ili više, mučan je i neprijatan. Zatim, sasvim iznenada, student kaže: "Počinjem da shvatom kvantnu mehaniku." ; ili još bolje, kaže: "Sada shvatom da nema šta da se shvati."... Za svaku novu generaciju studenata opada otpor koji treba slomiti da bi se prijatno osećali sa kvantnom mehanikom.

I Dyson se raduje jer se smanjuje "otpore prema nerazumevanju". Ali, zašto? Tradicija fizike (i svake discipline koja teži ka tome da zasluži ime nauke) je da objasni novajlijama, koji u nju ulaze, ono što se već sad može objasniti, dok se na naša neznanja i sumnje otvoreno ukazuje, kako bi se podstakla buduća istraživanja. Uprkos tome, u kursevima kvantne mehanike čine se veliki napor, kako bi se dobro naučile sve tehnike i retko kad se govorio o čemu se

tu zapravo radi. Student nauči kako da računa očekivane vrednosti i da rukuje operatorima, govoriti mu se o teoriji grupa i koeficijentima koji se iz nje izvode - ali mu se ne pokazuje kako da poveže ono, čime tako vešto rukuje, sa fizičkom realnošću.

Ova izuzetna situacija potiče od izuzetne prirode onoga što ostaje nerazjašnjeno u kvantnoj mehanici. Ne odnosi se to ni na metode ni na teorijske rezultate, još manje na njene eksperimentalne osnove; od svojih početaka, kvantna mehanika doživljava uspeh za uspehom i niko ne sumnja u njene izvanredne sposobnosti da objasni i predviđi prirodne pojave. Ono što se ne razjašnjava, kada se ona predaje, je interpretacija formalizma, na koji način ga treba povezati sa svetom koji nas okružuje. Ali, to je već problem koji se kreće u oblasti između fizike i filozofije - oblasti, koja je po dugoj, iako ne dostoјnoj poštovanja, tradiciji eliminisana iz studija fizike.

Problem interpretacije kvantnog formalizma svakako nije nov. Pojavio se skoro istovremeno sa samom teorijom, i dugi niz godina prouzrokovalo je široke diskusije. Sami stvaraoци kvantne mehanike zauzeli su vrlo različite stavove, između kojih nikada nije došlo do saglasnosti, jer su se ti stavovi zasnivali na neusklađivo suprotnim filozofskim koncepcijama, iako često nesvesnim i stoga nekonzistentnim. Tridesetih i četrdesetih godina rasprave su malo po malo utihnule; većina fizičara prihvatala je manje više indiferentan stav - teorija služi, daje tačne rezultate, onda, šta više tražiti? Dirac (1930) ovaj uzdržani stav izražava rečima:

Kvantna mehanika teži formulaciji osnovnih zakona tako da se iz njih može jednoznačno odrediti šta se dešava u svakom eksperimentu. Bilo bi uzaludno i besmisленo nastojati proniknuti u odnose između talasa i čestica dublje no što zahteva ovaj cilj... Jedina svrha teorijske fizike je izračunavanje rezultata koji se mogu poređiti sa eksperimentom, i ne postoji nikakva potreba za zadowoljavajućim opisom celokupne evolucije fenomena.

Tačnije rečeno, fizički su prihvatali ovu ideju, ali kao istraživači u svom radu su i dalje koristili sve interpretacije, eklektično i vrlo često nekonzistentno pomešane. Tragove ove nekonzistentnosti i dalje susrećemo u našim udžbenicima.

Argumenti za opravdanje ograničenja implicitnog u onome što navodi Dirac, ne mogu se naći unutar same fizike; potrebno je pribeći filozofiji. Ustvari, sve do naših dana fizika je shvatala istraživanje kao izvor naših objašnjenja svojstava, procesa koje opežano u svemiru, a sada izgleda da treba radikalno raskinuti sa tom idejom.

Napori u tom smislu kretali su se u tri osnovna pravca.

Prvi se sastojao u traženju onih filozofskih struja, u čijem se okviru takva ograničenja javljaju na prirođan način. Neposredno se nameće naivni idealizam koji poriče postojanje realnog sveta, nezavisno od naše svesti, ili ga u potpunosti potčinjava ljudskom ili natprirodnom duhu; po idealistima, ne treba tražiti pravi uzrok jednog fizičkog procesa, jer takav i ne postoji, ili ga jednostavno zano zamišljamo. Takvi stavovi, međutim, neprihvatljivi su, na primer, za eksperimentalne fizičare koji se svakodnevno bore sa upornom prirodom, čija se realnost i nezavisnost ne može poreći. Stoga su u modu ušle različite škole koje proizilaze iz engleskog empirizma, vezanog za imena Berkeley-a (1709) i Hume-a (1739), a u nešto manjoj meri iz pragmatizma W. James-a (1912) i Dewey-a (1929). Zajedničko svim ovim filozofijama je da se "realni svet" gradi polazeći od čulnih opažanja koja se smatraju osnovnim "atomima" koje se ne mogu raščlaniti. Empirizmu je sledio pozitivizam, neopozitivizam i različite analitičke filozofije. Prema ovim školama proces izgradnje je logički proces, koji se podvrgava svaki put sve sofisticiranijoj analizi. Međutim, ako se svet izgradjuje polazeći od opažanja koja proizvode naša čula, zar nije razumno upitati šta se nalazi iza tih čulnih podataka; u stvari, filozofi pozitivisti odbacuju ovu vrstu pitanja, smatrajući ih "metafizičkim" i lišenim smisla.

Drugi pravac rešava problem razdvajajući fiziku i filozofiju. Još pre jednog veka, kada se fizika shvatala samo kao "prirodna filozofija", irelevantnost filozofije za fiziku bila bi smatrana za apsurd; međutim, takvo se mišljenje neverovatno duboko usadio, podržano rastućom specijalizacijom nauka. Iako su istaknuti fizičari našeg doba, gotovo svi, znali prevazići ovu veštačku barijeru, njihov aktivan interes za filozofske osnove nauke nije imao odjek na univerzitetima. Tek poslednjih godina zapaženi su neki bojažljivi napori za uspostavljanje ove veze.

Treći pravac mišljenja je još formalniji: pojavila se tež-

nja da se stvori jedna nova logika, uz jedini zahtev da kvantna mehanika, u svojoj sadašnjoj formulaciji i interpretaciji, bude sa njom kompatibilna. Drugačije rečeno, u konstrukciji logičkog aparata koji se koristi, postuliraju se pojmovi ekvivalentni najortodoksnijoj interpretaciji, tako fizička zasnovanost pojma u ustupa mesto "logičkoj nužnosti". Posebno se, u samu osnovu ove logike, uključuje nekompatibilnost merenja koja podležu Heisenberg-ovoj relaciji: nije čudo, stoga, što kao zaključak sledi nemogućnost ovakvih merenja. Glavni impuls ovome pravcu dali su Jauch (1968) i njegovi saradnici.*

Ova tri filozofska pravca su glavne, ako ne i jedine varijante najčešće korišćenih shvatanja, kada se postavi pitanje smisla kvantnog formalizma. Iako primena ovog formalizma u mnogočemu duguje radovima Bohr-a, manje više ortodoksna interpretacija koja otuda sledi obično se naziva kopenhagenskom - možda i nezасluženo, jer dobro delom potiče i od Heisenberg-a, Dirac-a, Jordan-a, Wigner-a i mnogih drugih fizičara. Kod svih njih se zapaža zajednička tendencija, koja, ili poriče ili ograničava realnost (bar na mikroskopskom nivou) sveta u kome živimo, koja govori o "kraju determinizma", te da je sada verovatnoća eliminisala usročnost - tendencija koja se opasno približava iracionalizmu (Comforth 1946, Lukács 1968).

Među prvima koji su se, novim idejama fizičke prirode i ne samo filozofskim argumentima, suprotstavili ovoj tendenciji, javljaju se Bohm (1952), a pre svega De Broglie (1953), jedan od tvoraca kvantne mehanike, koji je, nakon 25 godina prihvatanja "ortodoksnog" stava, bio do te mere njime nezadovoljan, da je preispitao osnove kvantne mehanike i čak započeo radikalnu reformulaciju celokupne teorije. Mnogi drugi autori su kritikovali ortodoksne koncepte i nismo u mogućnosti da navedemo iscrpmu listu.

Svakako da ne može biti dovoljna samo kritička aktivnost: ono što je, zapravo, omogućilo kritiku - bilo je postojanje jedne klase interpretacija kvantnog formalizma, koje ne zahtevaju filozofske ideje koje su toliko radikalno suprotne onima koje su do sada prihvatanе u fizici. To su statističke interpretacije, koje se karakterišu idejom da formalizam opisuje veliki skup (ansambl)

* Bohm i Bub (1966) dali su jednu korisnu diskusiju o problemima koje stvara "kvantna logika".

mikrosistema i predviđa evoluciju srednjih vrednosti u ansamblu, dok kopenhagenska interpretacija insistira na primenljivosti formalizma na pojedinačni mikrosistem. Činjenica je da ideja statističke interpretacije nije nova; predložio ju je u vrlo jasnim crtama Slater (1928). Međutim, u godinama kada je kvantna mehanika doživljavala uspeh za uspehom, bilo je teško prihvatići ono što podrazumeva statističku interpretaciju: ako formalizam opisuje samo srednje vrednosti za ansambl, tada je njegovo opisivanje individualnog sistema nekompletno. Onda mora biti moguće pronaći subkvantnu teoriju, koja proširuje i kompletira predviđanja, isto kao što je bilo moguće izgraditi statističku mehaniku, koja leži u osnovi termodinamike. Ovo je bilo često eksplisitno i implicitno poricano od strane branilaca ortodoksnosti, uglavnom preko jedne teoreme koju pokazuje Neumann (1932); jedan od njenih korolarova koristi se kao dokaz da ne postoje "skriveni parametri" - tj. dodatni parametri, koji bi dopunili kvantno opisivanje. Međutim, poslednjih godina se uvidelo da se ovaj zaključak zasniva na jednoj neadekvatnoj koncepciji skrivenih parametara, dok su istovremeno iskrsele teškoće u samom dokazu (Bell 1966).

Ovo je jedna od tačaka, gde različite interpretacije kvantnog formalizma dolaze u sukob, koji ima važne posledice za samu fiziku; međutim, kursevi kvantne mehanike obično ne osvetljavaju različite fizičke posledice različitih gledišta, već se i samo njihovo postojanje ignoriše. Svrha ovog rada je upravo u tome da skrene pažnju nastavnika i studenata na ove probleme, da ukaže na njihov fizički značaj i da ih poveže sa odgovarajućim filozofskim koncepcijama. U sledećem odeljku diskutovaćemo izvestan broj fizičkih problema, svaki od njih sa različitim filozofskim gledišta; u trećem odeljku nastojaćemo da izložimo u povezanoj formi dve glavne struje koje danas postoje, a u četvrtom govorićemo o perspektivama budućeg razvoja koje se naziru. Svakako da ne pretendujemo na to da prikažemo sasvim nova gledišta; pored već navedenih referenci, možemo navesti radove Buhge-a (1956) i Ballentine-a (1970) koji idu u istom pravcu.

Svakako će čitalac uvideti, da je za autore ovog članka statistička interpretacija jedina koja nudi koherentnu osnovu za kvantni formalizam; nije naša namera da plediramo za nju, već da razjasnimo važnost filozofskih koncepcija za rad istraživača u fizici: raznovrsnost filozofskih gledišta stvara prave probleme čije implikacije treba da upoznaju studenti, da bi stvarno mogli

shvatiti kvantnu mehaniku - a ne samo shvatiti "da nema šta da se shvati".

II NEKI FIZIČKI PROBLEMI I LJEHOVA INTERPRETACIJA

1. Relacije neodredjenosti

Jedno od mesta gde dolazi do najveće kontraverzije jeste čuvena relacija neodredjenosti za tilo koji par kanonskih promenljivih p i q :

$$\Delta p \Delta q \geq \hbar$$

Heisenberg je dobio ovu relaciju 1927. godine, kao direktnu posledicu kvantnog formalizma, samo što taj formalizam ne kaže šta se podrazumeva pod disperzijom Δp ili Δq , niti razjašnjava šta bi bio smisao relacije, čija je matematička vrednost van svake sumnje. Nije trebalo dugo da se razviju diskusije, koje još traju, o ovoj centralnoj tački problema interpretacije kvantne mehanike.

Problem se sastoji u tome, što izgleda da se u teoriji javlja **inherentno ograničenje** koje, svakako, nema svoj ekvivalent u klasičnoj fizici; bar tako stvari izgledaju. Sam Heisenberg kaže, na primer, da se relacija odnosi na "neodredjenost u mogućem poznavanju simultanih vrednosti različitih veličina kojima operiše kvantna mehanika" (Heisenberg 1930). Za ilustraciju ove neodredjenosti, Heisenberg je mislio jedan misaoni eksperiment, mikroskop δ -zraka, kojim možemo meriti položaj, recimo, jednog elektrona. Na elektron se usmerava foton, što je apsolutni minimum da bi opažanje bilo moguće; ako je λ talasna dužina ovog fotona i ϕ ugao otvora objektiva kojim posmatramo foton, onda je, po zakonima fizičke optike, neodredjenost položaja elektrona nakon rasejanja fotonu

$$\Delta x = \frac{\lambda}{\sin \phi}$$

Komptonovim efektom foton saopštava elektronu impuls, i kako je foton rasejan unutar konusa ugla otvora ϕ postoji neodredjenost

$$\Delta p_x = \frac{\hbar}{\lambda} \sin \phi$$

U x -komponenti impulsa, kao posledica, obe neodredjenosti zadovoljavaju relaciju neodredjenosti. Ako povećavamo λ da bismo smanji-

li grešku u impulsu, povećava se netačnost položaja, a kada smanjujemo λ , raste neodredjenost impulsa s kojim izleće elektron. Smisljeni su i mnogi drugi misaoni eksperimenti, koji su svi dovodili do istog zaključka.

Na prvi pogled, izgleda začudjujuće da teorija, koja ne pominje nikakve eksperimentalne tehnike, dozvoljava zaključke koji se odnose na moguću tačnost merenja. Kvark (1928) i Kennard (1928) pokazali su da sigurno najpre možemo upotrebiti foton vrlo kratke talasne dužine, tj. jako "tvrd" zrak, za određivanje položaja elektrona, a zatim upotrebiti "mekši" foton za merenje impulsa koji nastaje usled osvetljavanja prvim fotonom; proizvod eksperimentalnih neodredjenosti mogao bi onda biti znatno manji od \hbar . Heisenberg se složio sa tim, ali je dodao da se ove vrednosti "nikada ne mogu koristiti kao početni uslovi pri izračunavanju daljeg kretanja elektrona, i da stoga ne podležu eksperimentalnoj proveri. Stvar je ličnog uverenja, da li se ili ne, pripisuje fizička realnost takvom proračunu prošlosti elektrona." Izgleda da relacije neodredjenosti važe za budućnost ali ne i za prošlost. Međutim, Einstein, Tolman i Podolsky (1931) su uspeli pokazati da one moraju važiti za prošlost, ako važe za budućnost: zaključak koji, u stvari, sledi iz potpune reverzibilnosti kvantnog formalizma u odnosu na vreme (tj. ako na osnovu talasne funkcije Ψ nekog sistema, možemo predviđeti njegov budući razvoj, možemo na isti način rekonstruisati njegovu prošlost; za oba slučaja dovoljno je poznati Hamiltonovu funkciju sistema.).

Dok su se diskusije nastavljale, relacije neodredjenosti zauzele su centralno mesto u kvantnoj mehanici i njenim primenama, i u tom procesu dobole su svakako široku eksperimentalnu potvrdu. Ono što nije postalo jasno, bilo je: šta bi one mogle značiti? Jedni su se opredelili za shvatanje, po kojem je jednostavno otkriveno ograničenje naših mogućnosti saznanja realnog sveta, tako da će naša nauka ostati zauvek nesavršena; drugi su radije interpretirali situaciju kao neodredjenost inherentnu samoj prirodi i čak su na osnovama te neodredjenosti zasnivali teorije o slobodi volje, smatrajući ljudski možak kao neku vrstu pojačavača neodređenih i neuslovjenih fluktuacija (Eddington 1932.).

U ovakvom obliku, varijante ortodoksne interpretacije prouzrokovale su niz, više ili manje, iracionalnih pokušaja ograniča-

vanja naučnog saznanja. Da je reč o ortodoksnoj školi, vidi se odmah iz činjenice da se u svim ovim idejama smatra da se neodredjenosti Δp i Δq odnose na jedan jedini mikrosistem*, jedan elektron, na primer, ali neodredjenost za jedan individualni sistem teško da može značiti nešto drugo, do netačnost u eksperimentalno dobijenoj vrednosti za jednu varijablu. Ako je, međutim, neodredjenost nešto-stvarno inherentno celokupnoj teoriji, otuda sledi ograničenje eksperimentalnih mogućnosti. Onome, ko polazi sa više ili manje pozitivističkih stanovišta u filozofiji, takvi zaključci ne donose ništa začudjujuće: prelaz sa opažanja na realnost, koja mu leži u osnovi, ako je uopšte moguć, izgleda opasan i sumnjiv.

Međutim, ako prihvatimo da se kvantni formalizam primenjuje ne na pojedine sisteme, već na statističke skupove (ansamble), isto to će važiti i za relacije neodredjenosti. Eksperimentalno, dakle, vrednost Δq odgovara normalnoj devijaciji za jedan niz individualnih merenja, a greška u svakom merenju ponaša se, može biti znatno manja; slično važi i za Δp . Relacija između njih u statističkoj interpretaciji bila bi tačnije opisana kao relacija disperzije, a svakako ne kao relacija neodredjenosti. Stoga nije više dopušteno na relaciji Heisenberg-a zasnivati ograničenja našeg saznanja o prirodi, ni semi-teološke rasprave kao Eddington-ove.

Treba napomenuti da eksperimentalni spektroskopista "narušava" analognu relaciju koja postoji između energije i vremena, kada određuje oblik profila lirie jednog emisionog spektra; da bi to bilo moguće, eksperimentalna greška sa kojom meri energiju mora biti znatno manja od širine lirie-i uprkos tome, upravo ova širina ograničena je relacijom $\Delta E \Delta t \gg \hbar$, u kojoj sada Δt treba interpretirati kao srednji život ekscitiranog stanja, koje se raspada pri emisiji lirie o kojoj je reč. Međutim, ovo "narušavanje" se ne vrši samo u primenama Heisenberg-ovih relacija, već je, kako je to naglasio Popper (1967), potrebno za eksperimentalni dokaz važenja samih tih relacija...

U statističkoj interpretaciji se, takođe, razjašnjava smisao koji treba pripisati misterioznoj izjavi Heisenberg-a, da relacije važe za budućnost, ali ne i za prošlost. Eksperimentalni

* Ova veza se diskutuje u odeljku 3.1.

podaci koji se odnose na prošlost su nam efektivno poznati, sa greškama merenja za svaku individualnu vrednost, a koje mogu biti znatno manje od granica, nametnutih relacijama neodredjenosti, ali za budućnost još nemamo merenja; posedujemo samo predviđanja teorije, a ova kao statistička, ne predviđa ništa više od disperzije koju će imati različite vrednosti koje ćemo meriti.

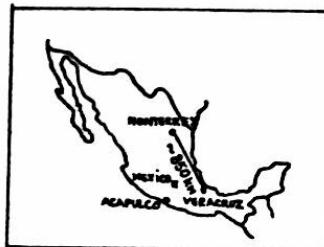
Kao što vidimo, različite filozofske interpretacije kvantne mehanike odgovaraju različitim fizičkim veličinama, koje se sve označavaju istim simbolima u formalizmu. U jednom slučaju Δx , na primer, interpretira se kao eksperimentalna greška u jednom jedinom merenju, a u drugom kao širina distribucije rezultata mnogih merenja. Ne treba se, stoga, čuditi što takvo stanje stvari dovodi do konfuzije.

2. Eksperiment Einstein-a, Podolsky-a i Rosen-a

Einstein, Podolsky i Rosen (1935) ukazali su na jedan od pojavno najznačajnijih problema, koji direktno proizilazi iz zbrke oko smisla Heisenberg-ovih relacija. Oni su predložili misao-ni eksperiment, koji je pokazao da kvantna mehanika nije komplet- na fizička teorija - ili alternativno: da nismo u mogućnosti da izdvojimo jedan ispitivan fizički sistem od sistema sa kojima je interagovao u prošlosti.

Verziju eksperimenta koju ovde dajemo, dao je Bohm (1951), a jednostavnija je od one koju su dali Einstein, Rosen i Podolsky u svom originalnom radu. Pretpostavimo jedan \bar{K} mezon u stanju zirovanja; pri raspodu na par elektron-positron, ove dve čestice se razilaze sa suprotnim spinovima u suprotnim pravcima. Kada već više ne mogu biti u interakciji (pretpostavimo da je jedan u Monterrey-u a drugi u Veracruz-u)*, merimo spin pozitrona, ili bolje

* p.p.



rečeno, merimo projekciju njegovog spina na horizontalnu ravan. Ako je $S_x^+ = 1/2$, zaključujemo da $S_x^- = -1/2$ treba da bude spin elektrona i ako je $S_x^+ = -1/2$ onda je $S_x^- = 1/2$. Isto tako, mogli bismo meriti S_z^+ projekciju spina pozitrona na vertikalnu ravan; onda bismo izveli vertikalnu komponentu spina elektrona. Ovde iškrsava problem: ako možemo na ovaj način odrediti S_x^- , onda S_z^- ostaje potpuno neodredjena; zbog mehanizma relacije neodredjenosti znamo da dva operatora projekcije spina ne komutiraju; i obrnuto, ako odredimo S_z^- , ostaje neodredjena vrednost S_x^- ; ali elektron nije više u interakciji sa pozitronom: kako je merenje na pozitronu proizvelo promenu onog što je dobro odredjeno za elektron? Einstein, Podolsky i Rosen (i sa njima Bohm) su zaključili da ono što nije dobro odredjeno, jeste predviđanje, koje daje teorija, dok bi fizički (na primer, u jednoj kompletnej teoriji) imalo smisla govoriti, a verovatno ih i simultano odrediti, o obe komponente elektronskog spina. Drugim rečima, kvantna mehanika nije komplet- na, te put za njeno kompletiranje ostaje otvoren. Jedina alternativa je da interakcija između dve čestice nikada ne iščezava.

U svom odgovoru, nejasnom i teškom da se interpretira, Bohr (1935) kaže da treba uzeti u obzir celokupnost eksperimentalnog uredaja; izgleda da on sugerira da ne možemo u potpunosti eliminisati neku moguću rezidualnu interakciju između dva sistema, ako je to smisao njegovog teksta. On ne nudi ništa više od prihvatanja druge alternative u žuvenoj dilemi, koju je formulisao Einstein (1949) sa dva, nedjusobno isključiva stava:

1. Talasna funkcija Ψ data kvantnom mehanikom obezbedjuje kompletno opisivanje individualnog mikrosistema.

2. Fizička svojstva dva sistema, koji fizički ne interaguju, su nezavisna

Međutim, Bohr-ov odgovor, a još više mnogi kasniji doprinosi diskusijama, govore u prilog interpretacije da je za njih prisustvo mernog aparata, ono što prouzrokuje promenu stanja elektrona. Odatle, pa do subjektivističkih ideja, postoji samo jedan korak: talasna funkcija ne daje informaciju o sistemu, već o našem poznavanju sistema. Ovo često još detaljnije prodiskutovati.

Prihvatajući stav 2. Einstein-ove dileme, statistička interpretacija ne nailazi na teškoće, jer se za riju kvantne predviđanje

odnosi na jedan niz eksperimentalnih rezultata, u kojem očekujemo obe moguće vrednosti za S_x^- (ako merimo ovu promenljivu direktno na elektronu) sa približno istom učestanošću, kojom merimo S_x^+ na pozitronu. Nijedna od posmatranih vrednosti nije individualno predviđena, već samo srednja vrednost i njena disperzija.

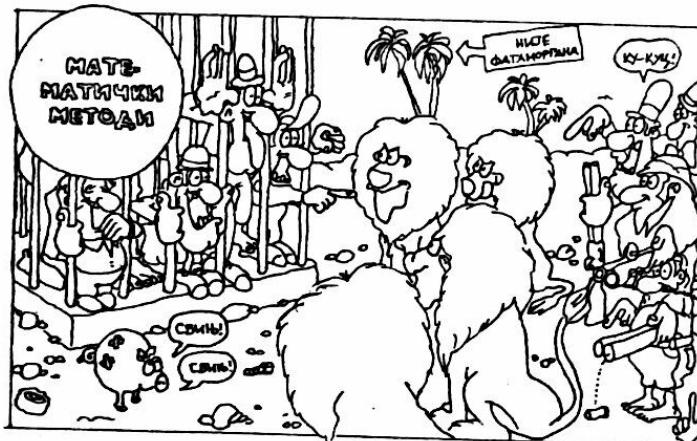
Nema potrebe za daljim ulaženjem u diskusiju, jer se detalji nalaze u članku koji dopunjuje ovaj (La peha icetto, 1974.).

- nastaviće se -

KAKO ULoviti lava u SAHARI

Da bi lovac mogao da ulovi lava u Sahari, u principu je neophodno da postoje lovac, Sahara i lav. Sam lov, ako su zadovoljena ova tri uslova, ne mora biti isključivo stvar lovčeve prakse, već i teorijski problem koji daje velike mogućnosti. Eleme, u tom smeru krenuli su članovi uglednih naučnih udruženja, kao što su: Klub za proučavanje beznačajnih problema pri Koledžu Sent-Džon u Kembriđu, Naučno društvo za beskorisna istraživanja pri Masačusetskom institutu za tehnologiju i Udržanje za unapredjenje naučnih gluposti pri Univerzitetu Princeton. Rezultati njihovog rada objedinjeni su u veličanstvenoj naučnoj studiji, u kojoj se pitanje lava lavova u Sahari, sa praktičnog, prebacuje na čisto teorijsko područje.

Evo nekoliko varijanti teorijskih rešenja.



Metod inverzije. Postavimo sferični kavez u puštinju i udijemo u njega. Zatim, izvršimo inverziju u odnosu na kavez. Na taj način dobijamo lava u kavezu, a mi smo van kaveza.

LASERSKA FUZIJA

C. Martin Stickley

Da li će serija nuklearnih eksplozija u minijaturnim pilulama vodenika, podstaknutih na fuziju laserskim zracima, postati dugoročna metoda za obezbeđenje svetskih energetskih potreba?

Laserski vodjena fuzija, zasnovana na praktično nepresušnom "nalazištu" goriva, deuterijumu iz vode, je jedan prilaz trajnijem rešenju problema obezbeđenja snabdevanja sveta energijom. Ovo je, takodje, zajedno sa fuzijom držanom magnetnim poljem, jedan od najtežih zadataka koje je nauka do sada rešavala.

Jedinstvena sposobnost lasera da proizvede veoma visoku trenutnu koncentraciju energije na unapred određenom prostoru malih dimenzija, pruža mogućnost dovođenja termonuklearnog goriva u stanje veoma visoke temperature i gustine plazme na kojoj dolazi do fuzije. (Ovi uslovi se postižu kod nuklearnog oružja, korišćenjem energije oslobođene fisionom reakcijom, koja dovodi gorivo u stanje pogodno za fuziju.) Uspeh laserske fuzije zahteva prenos osnovnog dela energije lasera do mase goriva, pre zagrevanja goriva, da se ne bi smanjila postignuta kompresija, kao i pre nego što udarni talas prouzrokuje raspršivanje goriva/*1*).

Pošto je veliki deo teorije i mnoge tehnike za lasersku fuziju već bio dostupan iz razvoja nuklearnog oružja, koje je izazvalo istraživanja u oblasti fuzije u ranim pedesetim godinama, osnovni napar u programu laserske fuzije bio je dobiti monopulsirajući laser visoke snage i razumeti dinamiku interakcije njegovog zraka sa materijom.

Laserski zrak ili snop čestica

Fuzioni neutroni prvi put su prizvadeni iz zagrevanih i komprimiranih tableta goriva u SAD (EMS Fusion Inc. , Ann Arbor, Michigan) 1974. godine. Tač 1976. g. Lorenz Lajvermor (Lawrence Li-

vermore) laboratorija, je bila u stanju da dokaže termomuklearno poreklo neutrona iz implozija tableta, pri čemu je dobijano po preko 10^5 neutrona iz ponovljenih eksperimenata. Kompleksni kompjuter-ski programi mogu predviđeti rezultat ovih, sa značajnom tačnošću, obuhvatajući široki opseg prinosa neutrona. Sistem za fuziju, koji koristi mete visokog prinosa, koje bi već sada mogle da se konstruišu sa velikom sigurnošću, proizvodio bi i 10^{19} neutrona visoke energije (14,1 MeV). Ova energija može da ima višestruku primenu, uključujući prevodjenje u električnu energiju, prozvodnju sintetičkog goriva, otogađenje fusionog goriva i za grejanje. Ove primene su zajedničke i pri raznim pristupima fuziji. Međutim, inercijalno održavanje fuzije potiče laserom, kružna mogućnosti za proučavanje fizike nuklearnog oružja i simuliranje njegovih efekata u laboratorijskim uslovima.

Šestični snop može zamjeniti laser u stvaranju uslova za fuziju u veoma maloj masi goriva. Snopovi šestica visoke energije su već dostupni, i njihova tehnologija je relativno dobro razumljiva. Ipak oni, kao i laseri, imaju osobene probleme povezane sa njihovom upotrebljom. Obrazovanje snopa i njegovo fokusiranje u takvu se nekog rastojanja od izvora snopa, su najkritičniji među njima.

Tako razumevanje pojava na metama nije na istom stupnju kao njihova tehnologija. I pored toga, 1975. god. su u SSSR i 1976 u SAD uspešne implozije tableta goriva elektronskim snopovima. Istovremeno se, već više od godinu dana, vrše rapori, uglavnom u krugu fizičara visokih energija, da se ostvari prilagodljivost tehnologije akceleratora teških jona za fuziju.

Program inercionalno održavane fuzije je još uvek u relativno ranom stadijumu, kada se ima u vidu radni fusionci energetski sistem kao cilj. Međutim, postignuta su značajna dostignuća u razvoju jedinstvenih izvora visokog energetskog pika. Bez toga, stekli smo dovoljno vladanje fizikom interakcija lasera i snopa šestica sa metama, tako da smo u stanju da projektujemo, sa izvesnim pouzdanjem, ono ~~ko je potrebno za krupne inercionalne fuzione energetske sisteme~~. Naučna izvodljivost - iniciranje paljenja goriva energijom iz tableta, prevazilazi absorbovanu energiju zraka - može se izvesti laserskom energijom reda veličine jedne trećine do jedne polovine megadžula. Ovakav laser-Kova neodinijum staklo biće napravljen 1979.g. u Lorenz Lajvermor laboratoriji - biće u upotrebi, prema očekivanju, 1984/85.

Laseri i snopovi šestica koje je moguće dovesti do pikova vi-

* Sandia Laboratories, Albuquerque

soke energije i učestalosti rada razvijaju se paralelne sa nizom proizvedenih Lajvermorskih neodinijum staklo lasera. Parametarske i ekonomski studije pokazuju da je inercijalna fusija tehnički isvedljiva i da fuziona energija zasnovana na inercionalom održavanju pruža mogućnost izvora energije već početkom idućeg veka.

Osnove

Mogućnost proporcionaliranja reakcija inercijalne vodjene fuzije do reakcionih uslova oslanja se na razumevanju interakcije imajuće fuzije sa materijom.

Za ovu diskusiju, smatraćemo da je laser izazivač fuzije, iako se i drugi izazivači trenutno ispituju. Goruća tableta se sastoji iz gustog jezgra koje je okruženo redjom koronom od plazme. Fizika interakcije koja vodi do termomuklearnog sagorevanja može se podeliti u četiri kategorije:

- apsorpcija u redjoj oblasti
- transport energije iz oblasti apsorpcije do jezgra tablete
- hidrodinamika kompresije
- fuzionalno sagorevanje jezgra.

Razumevanje procesa apsorpcije je znatno prošireno poslednjih godina. Apsorpcija je kombinacija klasičnog i inverznom zakočnog zračenja i talasnih fenomena, kao što je rezonansna apsorpcija. Eksperimentalna merenja pokazuju da se približno polovina laserske svetlosti apsorbuje kad ova pada na ravan, a četvrtina kada pada na sferu. Transport apsorbovane energije iz apsorpcione do kompresione oblasti, predstavlja neklasičan proces, u kome električna i magnetna mikropolja kože rasturanje energije. Proučavanja ovog efekta pokazuju da može da nastupi i deset puta veće kočenje. Neprekidno pružavanje ovih procesa dovelo je do projekta meta koje optimalizuju tok energije u oblast kompresije.

Transport energije predstavlja kombinaciju termalnog udarnog talasa, poznatog kao "Maršakov (Marshall) talas". Ovaj talas određuje fizički karakter kompresije. One se javljaju kada se veoma slabih (kvaziizentropski) udarni talasi koriste za kompresiju još hladnog centra. Ako se centar greje pre početka kompresije, pritisak jezgra bi bio viši, pa bi trebalo utrošiti znatno veći rad na sabijanje jezgra. Kada se jezgro mete sabije i sagorevanje počne, njegovo trajanje treba da bude minimalno da bi se dobio neto prinos energije. Dobijanje energije iz goriva je srazmerno kvadratu njegove gustine i zahteva temperaturu paljenja od $5 \cdot 10^7$ K(5keV) za prihvatljivu gustinu goriva. Zato je težnja u inercijalno vodjenoj fuziji ka dobijanju

tableta podesnih za dobijanje velikih gustina. Takođe, u njima treba zadržati upaljeno gorivo dovoljno dugo, da njegov značajni deo sagori.

Željeno vreme održavanja fuzije izračunava se iz Losonovog (Lawson) kriterijuma, koji kaže, da proizvod gustine i vremena održavanja mora biti veći od 10^{14} s/cm^3 za D-T sagorevanje iznad 5keV. Znači potrebne su gustine i vremena reda veličine $10^{25} \text{ jona/cm}^3$ i 10ps. Za primenu u energetskim sistemima, potrebne su mete prinosa većeg od 100; ovo može da zahteva veći Losonov broj.

Proces sabijanja i sagorevanja može se optimalizovati na nekoliko načina. U optimalnom procesu sagorevanja, jezgro ostaje relativno hladno za sve vreme kompresije i samo se njegov centar zagreva do stanja paljenja; zatim se pali ostatak jezgra komprimovanog goriva- gorenje se širi radijalno. Ovakav proces je optimalan, jer je potrebno mnogo manje energije za sabijanje jezgra, nego za njegovo zagrevanje; zagrevanje samo malog centra jezgra i dozvoljavanje da deo dobijene fuzione energije zagreva ostatak goriva, svodi na minimum lasersku, ili energiju pobudjivanja, potrebnu za datu neto dobijenu energiju.

Da bi se ostvario koncept centralnog paljenja, potrebno je proizvesti tablete, kod kojih je proizvod gustine ρ i prečnika r veći od $0,3 \text{ g/cm}^2$. Kada je ovo postignuto, veći procent proizvedenih protona visoke energije i alfa čestica bivaju uhvaćeni u regionu goriva i njemu predaju svoju energiju. Tako, gorivo postaje još toplije i efikasnije gori.

Već su projektovane mete sa kompresijom do velikog ρr , sa centralnim paljenjem i energetskim dobitkom od 1000. Ovakve mete visokog prinosa su mnogo složenije od, često korišćenih, pojedinačnih školjkastih staklenih mikrobalona sa deuterijum-tricijum gasom. Ove jednostavne školjke imaju prečnik od sto mikrona i debljinu od nekoliko mikrona, sa gasnim punjenjem od nekoliko do sto atmosfera, tako da je D-T masa u okviru nanograma.

Prihvatljivo simetrično osvetljavanje postiže se sa dva zraka, koja osvetljavaju metu sa raznih strana ili sa reflektorskom optikom u obliku školjke, koja osvetljava veliki deo površine mete. Kratki impuls energije, reda od 10 do 100 pikosekundi, na meti pružačkuje brzo grejanje staklene školjke i unutrašnji i spoljašnji eksploziju. Kretanje ka unutrašnjosti sabija D-T gorivo i povišava njegovu temperaturu do tačke, na kojoj nastaju termoneuklearni neutroni. Ovaj tip mete naziva se "eksplođajući gurač" ("exploding pusher") i treba ga razlikovati od mete "uzročne kompresije" ("abla-

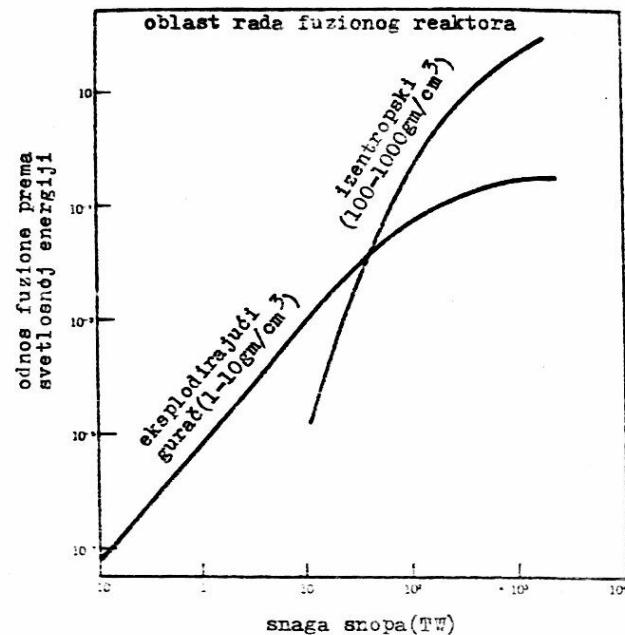
tive compression") ili "izentropske kompresije" ("isentropic compression"), o kojima će se dalje diskutovati. Relativno je lako ustvari imploziju udarnih mete, jer se gorivo jako zagreva, kraćači mogli meriti. Na primer, više od 10^9 neutrona dobija se laserskim uredjajem od nekoliko teravata. Ekstreman oblik eksplodirajuće gurne nego što dodje do primetne ekspanzije školjke. Ako ovakve mete relativno lako implodiraju, proračuni pokazuju da se ne mogu dobiti dovoljno visoki prinosi za korisnu proizvodnju fuzione energije.

Vrsta mete nazvana "uzročno kompresiona" ili "izentropsko kompresiona" je, u principu, istog ili većeg prečnika od eksplodirajuće gurne, ali sa debljom školjkom. Deblja školjka ima dve uloge:

- sprečava elektrone visoke energije da pregreju D-T gorivo
- isparava i juri napolje, uzrokujući unutrašnji transfer momenta do D-T goriva.

Nasuprot načinu udarne eksplozije, energija lasera deluje na metu tokom većeg dela ili čitavog vremena u kome gorivo implodira momentnom reakcijom mnogo je efikasnija u predavanju veće količine momenta ka unutrašnjosti goriva. Tako se dobijaju mnogo veće sabijene gustine, nego u eksplodirajućim guračima. Pošto je elektronsko predgrevanje za uzročne kompresije manje, oni zahtevaju niže krajnje temperature goriva od eksplodirajućih gurača. Eksplodirajući gurači, prema tome, teže da dostignu više temperature i manje gustine od uzročnih kompresija. Sa druge strane, uz dovoljno delovanje laserske energije, moguće je postići veću efikasnost sagorevanja i tako tablete višeg prinosa, sa uzročnim kompresijama. Ovo se vidi na slici 1, gde je prinos prikazan kao funkcija snage mete eksplodirajući gurač i uzročnu kompresiju. Mete uzročne kompresije mogu se javiti u nekoliko oblika. Projektovane su višeslijne mete, u kojima materijal malog atomskog broja služi (kao uzročnik) za izgradnju spoljašnje ljske. Unutrašnja ljska je od materijala većeg atomskog broja, kao što je zlato, i služi kao "gurač" ili "nabijač", koji je potiskivan ka unutrašnjosti uzročnom reakcijom. Ovaj tip mete može da uključi kriogene slojeve, u kojima gorivo može da bude zamrznuto kao unutrašnji sloj na guraču. U ovom poslednjem slučaju, sam centar mete može biti šupljina.

U slučaju uzročne kompresije, može biti potrebno pažljivo oblikovanje vodećeg impulsa; početni udari, dobijeni laserom kroz gurač, treba da budu slabici, da bi sveli na minimum hidrodinamičko pregrevanje, a kasniji udari da proizvedu jako sabijanje goriva. Zahtevi za oblikovanje impulsa mogu biti smanjeni konstrukcijom



Slika 1. PREDSLAZAN PRINOS ENERGIJE LASERSKOM FUZIJOM u dve vrste tableta, izentropskoj i eksplodirajućem guraču. Prinos eksplodivnog gurača (paljenje veoma kratkim pulsevima) potvrđen je eksperimentalno za snage do 4 TW na metama. Predviđeni prinosi dvačetka predlažu da visoki prinosi, neophodni, za lom napola i proizvodnju energije verovatno će se dobiti samo sa izentropskom vrstom mete.

strukture tableta u višeslojnu konfiguraciju.

Teškoće u istraživanju inercijalno vodjene fuzije predstavljaju projektovanje meta i predviđanje njihovog ponašanja, što zahteva kompleksne kompjuterske programe. Za optimalno sparivanje meta i laserskih impulsa, moraju biti određene osobine meta kao funkcija mase školjke, aspekt odnosa (odnos prečnika i debljine školjke) i posetne gustine školjke. Ovo zahteva razradjene proračune karakterističnih energija, vremenskih skala hidrodinamičkog kretanja i osobina materijala na visokim temperaturama i gustinama, koje ranije nikad nisu bile postignute u laboratoriji.

Podaci iz eksperimenta su ekstenzivno modelirani na dvodimenzionim kompjuterskim kodovima, koji uključuju plazma fiziku apsorpcije, transport, hidrodinamiku i dinamiku sađorevanja D-T. Proučavanja fenomena fizičke plazme i sabijanja eksperimentalnih meta, bitno su

povećala mogućnost predviđanja i dozvolila realniju procenu zahteva za inercijalno vodjenu fuziju.

Najveći problem sa kompleksnijim metama je proizvodnja višestrukih slojeva, sa površinama obradjenim do visokog kvaliteta. Nepravilnosti površine za više od 1% od debljine zida, izgleda da dovodi do veoma nestabilnih sabijanja debelih školjki. Školjke, koje sačinjavaju metu, moraju da budu strogo koncentrične. Ako se zahtevaju kriogeni slojevi goriva, teškoće, koje se sada rešavaju, da bi se napravile ovakve mete, biće zdržane sa problemima rukovanja njima u okruženju mete-komore. Kada se javlja šupljina ili slojevi ispunjeni gasom, strukture u njima moraju da budu podržavane nekom tehnikom, koja tek treba da bude razvijena. Laboratorije razvijaju tehnologiju izrade takvih meta sa velikim stepenom pouzdanosti.

Jesno, savršenije mete predstavljaju oštar kontrast ranijim i jednostavnijim metama eksplodirajućeg gurača, za koje je mnogo lakše zadovoljiti oblik impulsa, simetriju zračenja i tolerancije obrade mete. Sada dostupnim laserima, nedostaje energija potrebna, kako za snažno sabijanje, tako i za dovoljno zagrevanje mase goriva da se dobije veliki termonuklearni prinos. Međutim, uskoro treba da budu dostupni laseri, koji će imati dovoljno energije da pokrenu uzročnu kompresiju - što treba da predstavlja naučnu prekretnicu velikog značaja u ovom programu. Sem toga, nove kombinacije poboljšanih konstrukcija meta, veće energije lasera i veće snage na metama, nesumnjivo vode ka boljem razumevanju fizike implozija meta i naše sposobnosti da predskožemo zakone ekstrapolacije, primenljive za eksperimente sa višim energijama.

- nastaviće se -

SUPERFLUID HELIJUM 3

Na svega nekoliko hiljaditih delova stepena Kelvina iznad absolutne nule, ovaj izotop helijuma protiče kroz sićušne pore bez trenja i ispoljava neobična magnetna svojstva

N. David Mermin i David K. Lee

Ako uopšte možemo govoriti o većoj ili manjoj zainteresovanosti naučne javnosti za određeno područje nauke uopšte, posebno fizike, onda slobodno možemo reći da je fizika ultraniskih temperatura, istorijski gledano, dugo ležala u zasenuku ostalih područja fizike i da se o toj graničnoj oblasti malo govorilo, a još manje pisalo. Međutim treba istaći da se već 1911. godine javljuju prvi eksperimentalni pokušaji istraživanja ultraniskih temperatura i to sa jednog potpuno novog stanovišta. Likvefakcija gasovitog helijuma omogućila je ostvarenje veoma niskih temperatura - od svega nekoliko stepena Kelvina, tada prvi put u laboratorijskim uslovima. Dalji razvoj tih istraživanja tekuo je gotovo uporedo sa razvojem kriogene tehnike, koja u današnjim uslovima omogućava ostvarenje još nižih temperatura - od svega nekoliko hiljaditih delova stepena Kelvina a samim tim i ispitivanje svojstava materije u tim uslovima.

Štaviše, postoji veoma snažna inicijativa za izvodjenje takvih eksperimenata. Ponašanje materije je u skladu sa osnovnim sistemom fizičkih zakona, poznatim kao kvantna teorija, i mada ti fizički zakoni opisuju ponašanje materije uopšte, oni se ipak najizrazitije manifestuju u području mikrosveta na atomskoj osnovi i još više u oblasti elementarnih čestica. No, ne smemo gutiti iz viđa činjenicu da se kvantni efekti ispoljavaju i kroz ponašanje velikih materijalnih celina, ali najizrazitiji i najlepši primeri kvantnih efekata su skriveni ili sasvim zasenjeni usled haotičnog

termičkog kretanja atoma u takvim kompleksima. Svaki novi napredak kriogene tehnike, koji omogućava smanjenje granične temperature, usavršavanjem ranijih sistema, (koji imaju za cilj snižavanje postojećih temperaturnih oblasti, tu imamo na umu, pre svega, tehničke aspekte tog problema), za faktor 10, skida novi veo sa "tajanstvenog kvantnog ponašanja tih kompleksa", koji omogućava često nastajanje potpuno novih naučnih pogleda i rezultuje novim naučnim i tehničkim napretkom.

Fenomen superfluidnosti je verovatno najlepši i, dakako, najmarkantniji primer kvantnog ponašanja velikih kompleksa materije, te predstavlja najadekvatniji odraz onih naučnih istraživanja koja su vezana uz fiziku ultraniskih temperatura. Prve vidljive manifestacije superfluidnosti javljaju se na temperaturama od svega nekoliko stepeni Kelvina, u slučaju tečnog helijuma 4, u prirodi najrasprostranjenijeg izotopa helijuma, izotopa sa masenim brojem 4. Ovde moramo napomenuti superprovodljivost, koja predstavlja jedan od pojavnih oblika superfluidnosti provodnih elektrona kod veoma velikog broja metala ili legura na temperaturama neposredno zavisnim od prirode materijala (metala ili legure), ali nikad višim od 25K.

Fenomen superfluidnosti odstupa od svih intuitivnih pretpostavki o mogućem ponašanju materije. Kretanje superfluida je u suprotnosti sa svim do sada poznatim zakonima trenja; superfluidi, naime, prolaze kraj prepreka bez poznatih efekata usporenja, toliko karakterističnih za normalne tečnosti, što nedvojbeno navodi na odsustvo, barem delimično, trenja, kao osnovnog uzroka usporenja normalnih tečnosti, u istim fizičkim situacijama. U ovom novom svojstvu superfluida leže uzroci, koji stvaraju mogućnost da jednom izazvane kružne struje superfluida prikazuju neznatnu tendenciju slabljenja u toku vremena. Kada sud sa He 4 polako zaročitamo, tečnost može, u suprotnosti sa očekivanim efektima, gotovo "odbiti" da u celini rotira sa sudom (tečnost kao da ne prihvata nametnuto kretanje; uzrok ovakve pojave treba, svakako, da tražimo u ranije pomenutom odsustvu trenja). Slične oblike ponašanja nalazimo i u slučaju elektronskog gasa superprovodnih metala u prisustvu spoljašnjeg magnetnog polja, tj., elektronski gas prisutan u metalu, može gotovo "ne prihvati" uticaje spoljašnjeg magnetnog polja na metal (kao da elektronski gas čini superprovodni metal neprovodljivim za strano magnetno polje). Pod uticajem spoljašnjeg polja, elektroni, kao nanelektrisane čestice, stvaraju takve struje koje eliminisu uticaj spoljašnjeg polja, što znači magnetno polje sup-

rotnoga smera, ali iste jačine, pa samim tim onemogućavaju prodiranje stranog polja u unutrašnjost takvih metalova.

Do pre nekoliko godina, fenomen superfluidnosti se vezivalo samo uz ponašanje He 4 i superprovodnika. Međutim, 1971. godine otkriven je treći oblik superfluidnosti u pojavama vezanim za tečni He 3. Dva helijumova izotopa ponašaju se u suprotnosti sa poznatim pravilima: naime, svojstva i veličine koje karakterišu jedne strane čvrstu, a sa druge strane tečnu fazu istih izotopa, veoma se razlikuju. I zaista, istraživanja vršena između 1930. i 1950. godine ukazivala su na postojanje veoma jakih razloga da He 3 ne može predstavljati superfluid. Danas je, međutim, poznato da se superfluidnost javlja kod He 3, štaviše, utvrđeno je da se mehanizam superfluidnosti He 3 veoma razlikuje od superfluidnosti He 4.

Otkriće superfluidnosti He 3 upoznaje nas sa jednim, bitno novim, superfluidom, iako se osnovne karakteristike superfluidnog ponašanja, tj. proticanje bez efekta trenja, zadržava kao osnovno svojstvo i jednog i drugog superfluida. Superfluidni He 3 javlja se na temperaturama, skoro 1000 puta, nižim nego superfluidni He 4. U oblastima gde tečan He 4 poseduje jednu normalnu fazu i jednu superfluidnu, He 3 prezentuje se sa jednom normalnom i tri različite superfluidne faze. Superfluidni He 3 imaju magnetna svojstva, što znači da merenje njihovih svojstava u jednom odredjenom pravcu mogu dati rezultate, potpuno različite od onih koji se dobijaju merenjima istih veličina u drugim pravcima. (Tu se misli na parametre koji karakterišu osnovna svojstva superfluidnog He 3.) Ovi izuzetni fenomeni, slično efektima utvrđenim kod superfluidnog He 4 i superprovodnika, izravno predstavljaju makroskopsku interpretaciju kvantne teorije. Zaista, rezultatima kvantne teorije mogu se objasniti, ne samo gotovo ekstremna razlika između dve normalne tečnosti helijuma, već i činjenica da se pod datim uslovima He uopšte može pojaviti u tečnom stanju.

Dva helijumova izotopa

Belijumovi izotopi su jedinstveni među svim, do sada, poznatim tečnostima, pre svega stoga što ne mrznu pri običnom pritisku, bez obzira na temperaturu kojoj su izloženi (mislimo tu na izloženost niskim temperaturama).

U suštini, oni se mogu ohladiti na bilo koji način da temperature koja odgovara absolutnoj nuli, a da pri tem, ipak, ostanu u

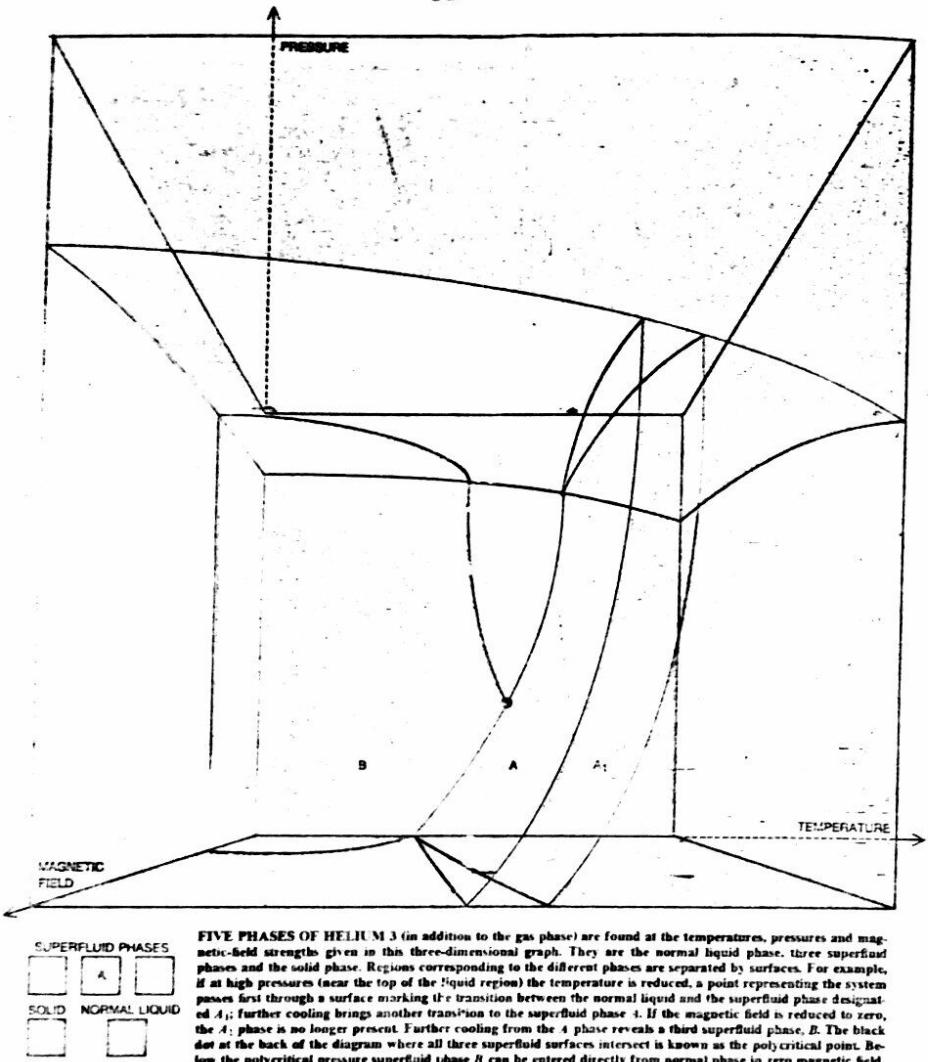
tečnom stanju. Čvrst helijum nastaje jedino pri hladjenju tečnog pod pritiskom.

Snižavanje temperature jedne supstance (njeno hlađenje) smanjuje ukupnu kinetičku energiju njenih atoma i molekula. Ako se temperatura dovoljno snizi, molekuli više ne poseduju energiju koja bi bila dovoljna da savlada međumolekularne sile privlačne prirode, koje teže da ih održe na okupu. Molekuli tada gube svoju pokretljivost i ograničeni su na određena mesta: supstanca prelazi u svoju čvrstu fazu.

Usled veoma malih medjuatomskih sile, zaključujemo na osnovu ranijeg izlaganja, helijum ne pokazuje efekte smrzavanja, bez obzira na temperaturu. Helijum je predstavnik inertnih, plemenitih gasova, to jest, one grupe elemenata u koju spadaju i neon, argon, kripton i ksenon. Medjuatomske sile u ovim elementima su izuzetno slabe. Neovisno o toj činjenici, svi predstavnici ove grupe elemenata, izuzev helijuma, mogu se bez ikakve promene pritiska prevesti u čvrsto stanje, pri dovoljno niskim temperaturama.

Jedna od, svakako, najtipičnijih u velikom nizu činjenica, koja neposredno proizilazi iz kvantne teorije, jeste nemogućnost očvršćavanja helijuma. U tečnom helijumu, nezavisno na kakvej temperaturi se tečnost nalazi, što znači da ona može biti i veoma niska, atomi poseduju još uvek dovoljno kinetičke energije, da mogu savladati privlačne međjuatomске sile. Ove su činjenice u potpunoj suprotnosti sa klasičnim (pred-kvantnim-teorijskim) pogledom, na osnovu koga bi ukupna kinetička energija nužno bila jednaka nuli, što znači da klasična teorija očekuje potpunu nepokretnost čestica, tj. da atomi ostaju u fiksiranom položaju.

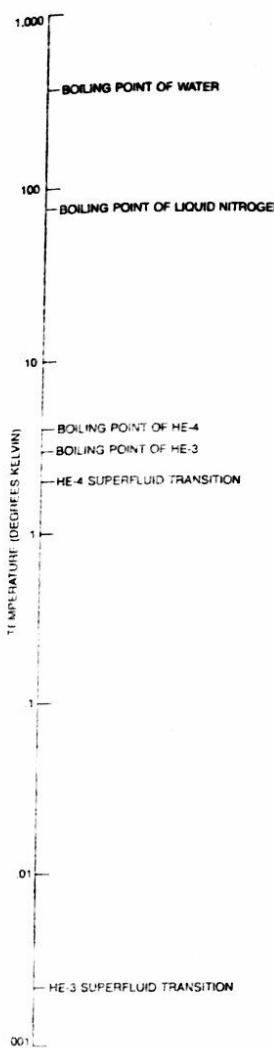
Shodno kvantnoj teoriji, ove se pretpostavke ne mogu smatrati potpuno tačnim. One, naime, nisu u skladu sa principom neodredjenosti, na osnovu kojeg položaj i impuls čestice ne mogu biti istovremeno odredjeni sa proizvoljnom tačnošću. Tačnije, ako je položaj jednog atoma precizno određen, što se očigledno odnosi na čvrstu fazu, tada impuls ili kinetička energija atoma moraju da budu neodredjeni do na jedan veoma mali, ali konačan iznos. Obrnuto, jedna čestica ne može imati nultu kinetičku energiju a da istovremeno zauzme neki određen položaj. U visoko organizovanoj kristalnoj rešetki, koja odgovara čvrstom stanju, položaj atoma precizno je određen (sa velikom tačnošću), te kinetička energija ne može biti tačno jednaka nuli. Na apsolutnoj nuli, atomi ipak poseduju neku "zaostalu" kinetičku energiju - "kinetičku energiju nulte



FIVE PHASES OF HELIUM 3 (in addition to the gas phase) are found at the temperatures, pressures and magnetic-field strengths given in this three-dimensional graph. They are the normal liquid phase, three superfluid phases and the solid phase. Regions corresponding to the different phases are separated by surfaces. For example, if at high pressures (near the top of the liquid region) the temperature is reduced, a point representing the system passes first through a surface marking the transition between the normal liquid and the superfluid phase designated A_1 ; further cooling brings another transition to the superfluid phase A . If the magnetic field is reduced to zero, the A_1 phase is no longer present. Further cooling from the A phase reveals a third superfluid phase, B . The black dot at the back of the diagram where all three superfluid surfaces intersect is known as the polycritical point. Below the polycritical pressure superfluid phase B can be entered directly from normal phase in zero magnetic field.

tačke", te stoga nisu stacionarni kao celina.

S druge strane, kinetička energija nulte tačke nekog objekta uvećava se uporedo sa smanjenjem mase istoga objekta. Kretanje je sporo, tako da, gotovo uopšte, ne deluje na sam objekat; dovoljno je, pri tom, da masa objekta bude veća od mikroskopske mase. Štaviš kretanje pojedinačnih atoma u takvim uslovima, takav je, učinjava bez nekih značajnijih posledica. Helij-



TRANSITION TEMPERATURES for liquid-vapor phase changes in helium are the lowest of these for all the elements; at the boiling point of helium all other substances are liquid. Superfluid transition temperatures of helium isotopes are 100 times lower than that of helium. The transition temperatures are the following: water (100°C), liquid nitrogen (77K), helium-4 (4.2K), helium-3 (2.1K), and the helium-4 superfluid transition (1.1K). Curves of similar type are degree

jumov atom, međutim, predstavlja najlakši inertni gas, što znači da je kretanje tog atoma u nultoj tački relativno veliko. Izuzev na visokim pritiscima, efekat intenzivnog kretanja u nultoj tački i slabe medjuatomske sile, ne dozvoljavaju stvaranje stabilne čvrste faze helijuma bez obzira na temperaturu.

Kvantno-mehanički efekti, ne samo da su odgovorni za tu nestabilnost čvrste faze helijuma, već su i razlog što se ni na nivou najjednostavnijih fizičkih karakteristika ne uočava sličnost izotopa He 3 i He 4. Ovo je odstupanje veoma značajno, tim pre, što nam je poznato da su izotopi jednog elementa veoma slični, kako po hemijskim, tako i po fizičkim svojstvima. Najlepši primer, koji to potvrđuje, su izotopi urana, tj. U_{235} i U_{238} . Ta dva izotopa su toliko slična, da i njihovo međusobno razdvajanje iziskuje ogromne napore. Smeša tečnih helijumovih izotopa (He 3 i He 4) očtro se suprotstavlja ovom pravilu, što se ogleda u njihovom spontanom razdvajaju uz određene temperaturne uslove. To znači da se ova dva izotopa ne mešaju, kao i neke druge tečne supstance (ulje i sirće).

Gotovo sva količina helijuma koja se nalazi u prirodi je izotop He 4. Izotop He 3 prvi put je primećen, u količinama dovoljnim da se stvori nekoliko kapljica tečnosti, tek u toku II svetskog rata. He 3 nastao je radioaktivnim raspadom tricijuma, najtežeg vodonikovog izotopa, koji se dobija u nuklearnim reaktorima.

Atomi He 3 i He 4, slični su, poput mnogog drugog para izotopa, u svojoj strukturi, osim u sklopu malenog atomskog jezgra. Podrobrija analiza atoma ovih helijumovih izotopa pokazuje da njih, izuzev jezgra, čini oblik negativnog naselektrisanja, koji potiče od dva elektriona. Pоказало se da su ti oblici za He 3 i He 4 veoma slični, ali neovisno od te

činjenice, izotopi tečnog helijuma izvanredno mnogo se razlikuju u svakom pogledu.

Činjenica da se ova dva helijumova izotopa znatnije razlikuju samo u strukturi atonskog jezgra, čini ovaj fenomen još interesantnijim. (Iskustvo, naime, pokazuje da razlike među pojedinim elementima, skoro uvek, potiču od strukture elektronskog omotača, koji određuje, kako hemijska, tako i fizička svojstva tела). Jezgro helijuma 4 sazданo je od dva protona i dva neutrona, dok helijum 3 ima dva protona ali samo jedan neutron. Zanemarujući kvantne efekte, dolazimo do zaključka da se razlika među njih očituje jedino u razlici njihovih masa; helijum 3 je lakša supstanca i njegova masa po atomu manja je od mase He 4 za oko 25%.

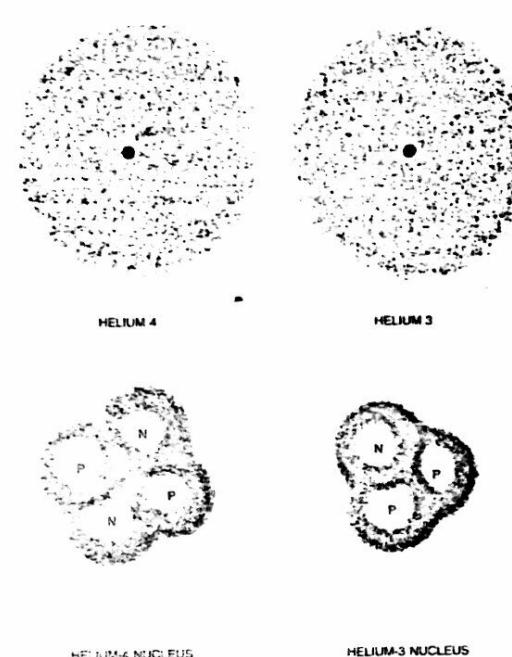
Sa aspekata klasične fizike, ova razlika u masama ne bi trebalo da se odražava na termičke osobine dvaju tečnosti. Ipak He 3 ključa na temperaturi, koja je za oko 25% niža od temperaturе ključanja He4. Samim tim, za postizanje stabilne čvrste faze He 3 iziskuje pritisak oko 25% veći nego u slučaju He 4.

Manja atomska masa He 3 svakako dovodi do znatno izraženijeg efekta kretanja u nultoj tački, što je u vezi sa utvrđenom činjenicom da je atomska He 3 potrebljana manja termička energija da bi se ostvario prelaz u paru. Shodno tome, potrebno je ostvaditi znatno veći pritisak da bi se atomi He 3 održali na okupu u krutoj kristalnoj rešetki.

Svojstva jezgra atoma helijuma

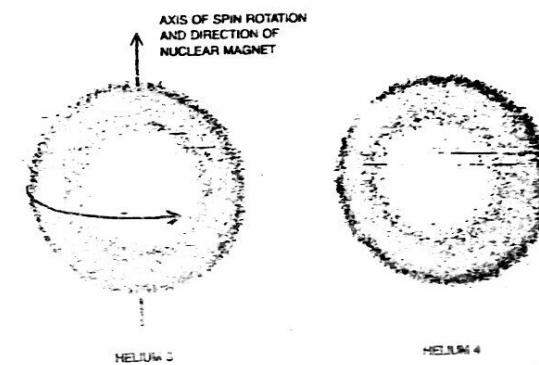
U cilju proučavanja svih uočenih razlika među tečnim izotopima helijuma, moramo se osvrnuti na opšte analize atonskog jezgra. Jezgro atoma helijuma 3 vrši rotaciono kretanje oko svoje ose. To se kretanje odvija stalanom brzinom i po svojstvima je slično kretanju žiroskop-a, s tim što se odvija bez trenja. Neposredna posledica tog kretanja je da jezgro poseduje određenu energiju rotacije. Sa druge strane, jezgro helijuma 4 se ne kreće.

Dublja analiza ove razlike, dovodi nas do sledećeg zaključka: atom He 3, upravo zbog svog rotacionog kretanja, predstavlja, u suštini, permanentni magnet, čiji su polovi smešteni duž rotacione ose, za razliku od He 4, koji stoga ne poseduje magnetna svojstva.



HELIUM-4 NUCLEUS HELIUM-3 NUCLEUS

ELECTRONIC STRUCTURES OF HELIUM ISOTOPES are almost precisely the same. The atoms of both helium 4 and helium 3 have two electrons, which form a spherical cloud of negative electric charge surrounding the nucleus (top). The two atoms differ significantly only in their nuclei, which are about 100,000 times smaller in diameter than the surrounding electron clouds. The helium-4 nucleus consists of two protons and two neutrons; the helium-3 nucleus has two protons but only one neutron (greatly enlarged at bottom). The physical and chemical properties of all other materials are determined almost entirely by the electronic structure of their atoms, but helium the differences in nuclear structure give rise to many pronounced differences in behavior of both the liquid and the solid forms of the two isotopes.



NUCLEAR PROPERTIES of helium 3 and helium 4 differ. The helium-3 nucleus has the a gyroscope and behaves magnetically as if it were a permanent bar magnet oriented along the axis of spin rotation. The vertical arrow indicates the direction of a magnetic pole; the horizontal arrow indicates the spin. The helium-4 nucleus possesses neither spin nor magnetism.

Da bismo istakli najznačajniju razliku između jezgara He3 i He4, moramo podrobniјe ispitati puteve kojima kvantna teorija opisuje čestice. U skladu sa kvantnom teorijom, svi parametri kojima opisuju neku česticu, iz velikog niza vrednosti, mogu poprimati samo određene diskretne vrednosti. Veličina elektriciteta je verovatno najlepši primer za to: sve poznate nanelektrisane čestice nose celobrojni umnožak elementarnog nanelektrisanja, nanelektrisanja elektrona ili protona, u zavisnosti od znaka. Na taj način, svakoj se čestici može pripisati određeni kvantni broj, koji označava veličinu njenog nanelektrisanja.

U mnogo više pomenje u dalju analizu unosi nepromenljivost brzina kojim čestice rotiraju. Pоказало se, da su te brzine svezane sa intenzitetom, tako da, ograničene na jedan mogući niz diskretnih vrednosti, koje karakterišu spin date čestice i čine njen stalno i nepromenljivo svojstvo slično nanelektrisanju.

Obigledno je, dakle, da nanelektrisanje i spin čestice predstavljaju primere kvantnih brojeva, koji se pripisuju česticama, a brojeva se strogo određenim vrednostima, karakterističnim za datu česticu. Takođe, postoje i takvi kvantni brojevi koji mogu po primiti i znatno širi dijapazon diskretnih vrednosti - to su kvantni brojevi, koji nam opisuju, bilo položaj, bilo impuls čestice.

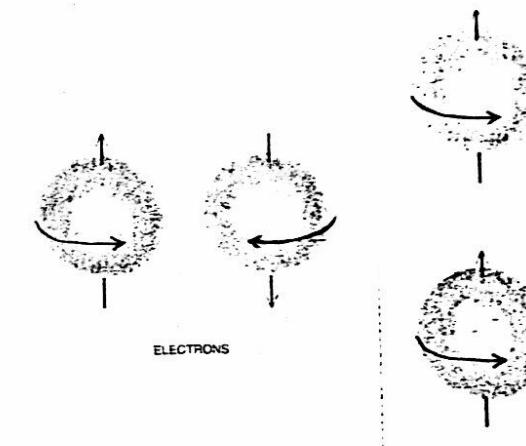
Sve informacije koje je moguće sakupiti o jednoj čestici u nekom trenutku, mogu se izraziti odgovarajućim kvantnim brojevima. Takođe skup kvantnih brojeva, koji pripisuju čestici, u potpunosti opisuje njen stanje i omogućuje potpunu analizu čestice, što znači da sađi, (unutar onih granica koje daje relacija neodređenosti) informaciju, kako o položaju, tako i o impulsu i kinetičkoj energiji čestice.

Pri opisivanju tečnog helijuma 3 ili helijuma 4, kao i pri likom izučavanju provodnih elektrona u superprovodnicima, neophodno je posmatrati ponašanje velikih grupa identičnih čestica. Utvrđeno je postojanje skupa elementarnih čestica poznatih kao fermioni, čiji su najpoznatiji predstavnici elektroni, protoni i neutroni. Značajno je napomenuti, da svi članovi grupe fermiona podležu osnovnom pravilu da je ponašanje tih čestica, u velikom broju, ograničeno na taj način da se dva fermiona istog tipa nikad ne mogu naći u istom stanju. Posmatrajmo, na primer, dva elektrona. Oni se međusobno moraju razlikovati barem u jednom od kvantnih brojeva, kojima ih opisuju. To je samo potvrda činjenice da se na jednoj dva fermiona ne mogu ponašati na isti način. U primeru navedenog pravila na elektronske orbite u atomima, leži osnova teorijskog

objašnjenja periodnog sistema elemenata; sa druge strane to pravilo daje i niz drugih fundamentalnih objašnjenja, manje ili više poznatih, ali gotovo podjednako značajnih, koja su od velikog značaja za potpuno razumevanje razlike između tečnog He 3 i He4.

Ne smemo gubiti iz vida, da sve elementarne čestice nisu ujedno i fermioni. Postoji i jedna druga grupa čestica, tzv. bozoni, sa π mezonima i fotonima, npr., kao osnovnim predstavnicima. Za bozone ne važi poznato fermionsko pravilo o neophodnosti razlike u stanju dve čestice iste grupe. Bozoni se čak mogu javiti i u veoma velikim skupinama, tako da su sve čestice nosioci istog stanja. Ovo gomilanje bozona u istom kvantnom stanju poznato je kao Bose-Einstein-ova kondenzacija. Neka skupina može, ali ne mora, biti Bose-Einstein kondenzovana. Za jedan sistem fermiona, takva je kondenzacija gotovo zabranjena.

Svaka poznata elementarna čestica (a u skladu sa novim teorijskim pogledima i svaka čestica koja će se buduće otkriti) pripada jednoj od dveju grupa: bilo fermionima, bilo bozonima. Jezgra atoma (slično jezgrima dva helijumova izotopa) su složeni sistemi. Svaka je jezgra sazdana od protona i neutrona i svaki je atom okružen elektronskim oblakom, što znači da atom čine tri



BOUNDED PAIRS OF FERMIONS are the condensed entities in superconductors and in superfluid helium 3. Superconductivity appears in a metal when the temperature falls low enough for the electrons to form bound pairs under the influence of a weak attractive force. In a like manner superfluidity appears in liquid helium 3 when pairs of atoms become bound together. In a bound electron pair in a superconductor the elementary magnets oppose each other, and the pair has no net intrinsic magnetism. The electrons also spin in opposite directions. The bound pairs of helium-3 atoms are quite different. The magnets reinforce each other, and as a result the pair possesses a net magnetism. Helium-3 nuclei also have same direction of spin.

vrste elementarnih čestica iz grupe fermiona.

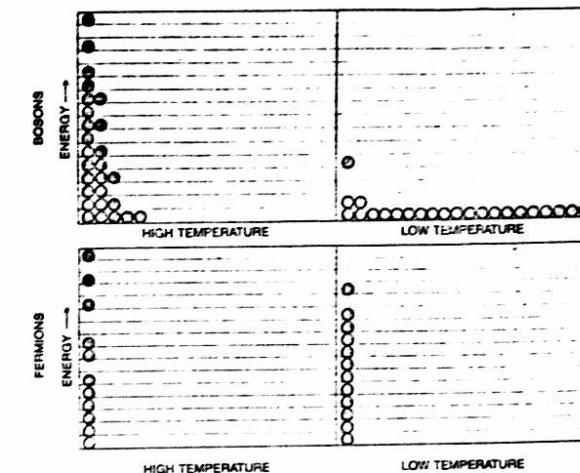
Globalno ponašanje sličnih složenih sistema, sačinjenih od dva ili više fermiona, podleže istim zakonitostima kao i ponašanje elementarnih čestica. Na pitanje, da li su te složene čestice bozonii ili fermioni, odgovor se daje u obliku veoma jednostavnog pravila: čestice sa neparnim brojem fermiona u seti (očigledno je tu najjednostavniji primer čestica sa jednim fermionom) ponašaju se kao fermioni, dok se one sa parnim brojem fermiona ponašaju kao bozoni. Prema tome, He 4, koji je sazdan od dva elektrona i jezgra sa dva protona i neutrona, očigledno je bozon, jer je broj fermiona u njemu paran (sadrži 6 fermiona). He 3, međutim, sa jednim neutronom manje u svom jezgru, predstavlja fermion. U osnovi ove činjenice leže i bitne razlike u ponašanju tečnih modifikacija He 3, odnosno, He 4.

Superfluidni prelaz

Superfluidno ponašanje He 4, prvi put je otkriveno 1911. godine, oimak nakon prvog topljenja helijuma, i do kraja 30-ih godina učena su sva superfluidna svojstva. Naime, pad temperature tečnog helijuma ispod 2,17 K doveo je do nagle i diskontinualne promene u njegovim osobinama. Ispod ove temperature prelaza, tečan He 4 postaje izvaređen topotomi provođnik i stiže svojstvo pratićenja bez ikakvog trenja kroz sićulne pore, koje su gotovo neprohodna za tečnost na višim temperaturama.

Tridesetih godina ovog veka, uočeno je da superfluidni prelaz tečnog He 4 mora biti povezan sa Bose-Einstein-ovom kondenzacijom, što znači, da u tom slučaju tečan He 3, koji je sazdan od fermiona, nema superfluidnu fazu. Stoga su se mogućnosti za dobijanje He 3 u količinama, koje bi bile dovoljne za potpuno izučavanje tečne faze, ponovo istraživale.

1950-te godine objavljeno je da se niti jedan superfluidni prelaz He 3 ne odigrava na temperaturama koje bi ležale u blizini 2,2 K. Stavište, eksperimentalno je utvrđeno da se He 3 može ohludit i do temperature koje su niže od stotog delja Kelvina, a da se pri tom ne uočavaju nikakvi znaci superfluidnosti. Ova su ispitivanja potvrdila činjenicu da Bose-Einstein-ova kondenzacija leži u osnovi superfluidnog ponašanja He 4 i to se staroviti zadržalo do danas.



COLLECTION OF BOSONS is subject to quantum laws different from those that apply to a collection of fermions. Any number of bosons can have exactly the same set of quantum numbers, and at very low temperatures it is possible for an appreciable fraction of them to be in precisely the same state. Fermions obey a different rule: Only one fermion can have a given set of quantum numbers, so that it is never possible to have more than one fermion in a given state. In our simple model these rules lead to the following distinct kinds of behavior. At high temperature the bosons are distributed over many states, which may or may not be occupied by more than a single boson. At low temperatures only the states of lowest energy are occupied appreciably, and number of bosons in state of lowest energy may actually be comparable to total number of bosons in system. Since only one fermion can occupy a given state, all that can happen as temperature drops is that occupied states settle down to group lying lowest in energy. Energy cannot be further reduced by assigning more than one fermion to lowest states.

	HELIUM 4	HELIUM 3	SUPERCONDUCTORS
TRANSITION TEMPERATURE (DEGREES KELVIN)	1.75 TO 2.2	.001 TO .0027	0 TO 23
ELEMENTARY PARTICLES OF FLUID	ATOMS	ATOMS	ELECTRONS
MAGNETIC	NO	YES	YES
STATISTICS	BOSON	FERMION	FERMION
ELECTRIC CHARGE	NO	NO	YES
CONDENSED ENTITIES	ATOMS	PAIRS OF ATOMS	PAIRS OF ELECTRONS
SPATIALLY SYMMETRIC	YES	NO	YES
MAGNETIC	NO	YES	NO
EXPEL MAGNETIC FIELD	NO	NO	YES
NUMBER OF SUPERFLUID PHASES	ONE	THREE	ONE

PROPERTIES OF SUPERFLUIDS are determined by the nature of the particles making up the fluid and by the manner in which those particles condense to form the superfluid phase. Superfluid helium 4 is formed through the Bose-Einstein condensation of single helium-4 atoms, which are neutral, nonmagnetic, spinless bosons. In a superconductor the condensed entities are pairs of electrons. The electrons are electrically charged, but the magnetism associated with the electron spin cancels within each pair. Superfluid helium 3 has some features of superfluid helium 4 and some features of a superconductor, but it also has features that are not shared by either of the other two superfluids. Because the pairs are not spatially symmetrical the properties of superfluid helium 3 can show a pronounced dependence on direction; because the pairs are magnetic an entire new category of macroscopically observable quantum behavior has been made available, because the fluid allows the introduction of a magnetic field new magnetic phenomena can be conveniently observed, and because there are three superfluid phases macroscopic quantum behavior is made available for study in a variety of forms.

Davnje otkriće superfluidnosti He 3 na temperaturama od svega nekoliko hiljaditih delova Kelvina nije potilo ranije utvrđene činjenice. Mehanizam koji leži u osnovi superfluidnosti He 3 naime, bitno se razlikuje od onoga na kome počiva superfluidnost He 4.

Ispitajmo sada na koji način Bose-Einsteinova kondenzacija dovodi do karakterističnih superfluidnih svojstava He 4. U tom cilju podjimo od jednog, nama mnogo bližeg, sistema, u kome kvantno-mehanički efekti određuju ponašanje velikih materijalnih celina. Amperovo objašnjenje magnetizma permanentnih magneta (u XIX veku) na osnovu postojanja trajnih mikroskopskih struja, navodi na pominjao da bi takve struje morale brzo izgubiti energiju, usled, takođe, trajnog procesa oslobođenja toplote.

Amper je, međutim, odbio da prihvati ovu tvrdnju, mada za to nije imao dovoljno argumenta. Ispravnost njegove hipoteze, potvrdila je tek kvantna mehanika. Pošto fizička svojstva, posmatrana na nivou atoma, mogu poprimiti samo diskretnе vrednosti, postepeno ali stalno povećanje intenziteta tih struja je nemoguće zbog otpora. U domenu individualnih atoma, gde su svojstva, dakle, određena diskretnim kvantnim brojevima, ona ostaju, ili potpuno ne-promenjena, ili se strahovito menjaju. Ako postoji razlozi, što je vrlo često, koji onemogućavaju da koji drugi skup diskretnih vrednosti, osim onih koji opisuju trenutno stanje atoma, tada su promene isključene.

- nastaviće se -



Metod atomske fizičke. Cela pustinja se obrači sporim neutronima. Lava postane radioaktivna i u njegovom organizmu počinje proces raspadanja. Kada proces dovoljno odmahne, potrebno je samo pokupiti one što je od lava ostalo.



Termodynamicni metod. Uzme se jedna polupropustljiva membrana, propustljiva za sve osim za lavove, i razapne se oko pustinje. Zatim se zavija ogradjeni deo bez smetanja flora i faune jer njih membrana propušta. Naišao "u preči" ostaju samo lavovi. Metod nije preporučljiv, zato je obrisao, jer može da dovede do iskrobljenja lava.

FIZIS 24

Stiven V. Hoking

KVANTNA MEHANIKA CRNIH RUPA
- nastavak -

april 1979

Debljina barijere oko crne rupe je proporcionalna veličini same crne rupе. To znači da vrlo malo čestica može da pobegne iz crne rupe kao što je ona za koju se predpostavlja da postoji u Labudu X-1, ali da čestice mogu da cure veoma brzo iz manjih crnih rupa. Detaljna izračunavanja pokazuju da emitovane čestice imaju termalni spektar sa odgovarajućom temperaturom koja raste rapidno kako se masa crne rupe smanjuje. Za crnu rupu Sunčeve mase ta temperatura je samo oko desetmilionitog dela kelvina iznad apsolutne nule. Toplotno zračenje crne rupe sa takvom temperaturom je potpuno neprimetno u odnosu na pozadinsko zračenje u Svetomiru. S druge strane crna rupa sa masom od samo miliјardu tona, tj. otprilike veličine protona, imala bi temperaturu od nekih 120 milijardi kelvina, što odgovara energijama od oko 10 MeV. Na takvoj temperaturi crna rupa bi mogla da stvara elektronsko-pozitronske parove i čestice bez mase, kao što su fotoni, neutrini i graviton. Takva primordijalna /tj. ostatak iz ranih epoha Big Benga/ crna rupa bi oslobadala energiju sa snagom od 5000 megavata, dakle kao šest većih nuklearnih elektrana.

Kako crna rupa emituje čestice, njena masa i veličina polako opadaju. To omogućava česticama da lakše tuneliraju napolje, i emisija se stalno pojačava sve dok eventualno crna rupa potpuno ne izrači sebe i nestane. Dugoročno gledano, sve crne rupe u Svetomiru bi isparile na taj način. Međutim, za velike crne rupe potrebno vreme je zaista veliko: crna rupa mase Sunca bi potrajala oko 10^{66} godina. S druge strane, primordijalne crne rupe bi trebale da već skoro sasvim nestanu u 10^{10} godina koliko je otprilike prošlo od početka Big Benga. Takve crne rupe bi sada emitovale tvrde γ -zrake sa energijom od oko 100 MeV.

Proračuni koji smo načinili Don N. Pejdž sa Kalteka i ja, zasnovani na merenjima kosmičkog fer- γ -zraka načinjenim uz

pomoć satelita SAS-2, pokazuju da srednja gustina primordialnih crnih rupa u Svetmiru mora biti manja od oko 200 po kubnoj svetlosnoj godini. Lokalna gustina u našoj Galaksiji mogla bi biti i milion puta viša, ako su primordialne crne rupe koncentrisane u haloima galaksija, a ne uniformno raspodeljene u Svetmiru. To bi značilo da je primordialna crna rupa najbliža Zemlji daleko barem kao planeta Pluton.

Finalni stadijum isparavanja crne rupe protekao bi tako brzo da bi se završio ogromnom eksplozijom. Koliko snažna bi bila takva eksplozija zavisi od toga koliko vrsta elementarnih čestica zaista postoji. Ako su, kao što se sada veruje, sve čestice sastavljene od verovatno šest različitih vrsta kvarkova, finalna eksplozija bi imala energiju ekvivalentnu 10 miliona megatonskih hidrogenских bombi. S druge strane, alternativna teorija elementarnih čestica koju je postavio R. Hagedorn iz CERN-a tvrdi da postoji beskonačan broj elementarnih čestica sve većih i većih masa. Kako se crna rupa smanjuje i zagreva, emituje sve veći broj različitih vrsta čestica, i produkuje eksploziju možda 100.000 puta snažniju od one israđunate po hipotezi kvarkova. Tako bi posmatranje eksplozije crne rupe pružilo veoma važnu informaciju o fiziči elementarnih čestica, koja ne bi bila dostupna ni na koji drugi način.

Eksplozija crne rupe bi proizvela ogroman izliv tvrdih γ -zraka. Iako oni mogu da budu registrovani γ -detektorima na satelitima ili balonima, bilo bi teško lansirati detektor dovoljno veliki da ima razumno šansu da registruje dovoljan broj γ -fotona iz jedne eksplozije. Postoji mogućnost da se pomoću "Spejs Šatla" /američka aerokosmička letilica za višekratnu upotrebu/ izgradi veliki γ -detektor u orbiti. Lakši i mnogo jeftiniji način je da se Zemljina gornja atmosfera upotrebii kao detektor. Visokoenergetski γ -zrak koji zaranja u atmosferu stvara pljusak elektronsko-pozitronskih parova, koji će u početku putovati brže od svetlosti /svetlost je usporena interakcijama sa molekulama vazduha/. Tako elektroni i pozitroni kao da probijaju zvučni zid, ali u elektromagnetskom polju, izazivajući udarni talas. Taj udarni talas, poznat kao Čerenkovsko zračenje, može se posmatrati sa zemlje kao bljesak vidljive svetlosti.

Preliminarni eksperiment koji su izveli N. Porter i T. Vicks sa Univerzitetskog Koledža u Dablinu, pokazuje da ako crne rupe eksplodiraju na način koji predviđa Hagedornova teorija, onda ima manje od dve eksplozije po kubnoj svetlosnoj godini i stoljeću u našem delu Galaksije. To bi značilo da je gustina primordialnih crnih rupa manja od 10^{-8} po kubnoj sv. godini. Moguće je bitno poboljšanje osetljivosti ovakvih posmatranja. Čak ukoliko ona i ne potvrde postojanje primordialnih crnih rupa, biće od velikog značaja. Postavljanje niske gornje granice na njihovu gustinu bi indiciralo da je mladi Svetmir bio veoma homogen i neturbulentan.

Big Bang podseća na eksploziju crne rupe, ali u neuporedivo većoj razmeri. Otud se možemo nadati da razumevanje kako crna rupa stvara čestice vodi do sličnog razumevanja kako Big Bang stvara sve u Svetmiru. Kod crne rupe materija kolapsira i izgubljena je za vek, ali umesto nje se stvara nova. Otud može biti da je postojala ranija faza Svetmira u kojoj je materija kolapsirala, da bi se ponovo stvorila u Big Bengu.

Ako materija koja kolapsira i stvara crnu rupu ima neki električni naboј, i rezultujuća crna rupa će ga imati. To znači da će ona težiti da privuče one članove virtuelnih parova koji imaju suprotan naboј, a odbijati one sa istim. Tako će crna rupa pretežno emitovati čestice istog naboja kao i ona sama, te će u stvari rapidno gubiti svoj naboј. Slično tome, ako je kolapsirajuća materija imala neki uglavni moment, i rezultujuća crna rupa će ga imati, i pretežno emitovati čestice koje će ga odnositi. Razlog zašto crna rupa "panti" masu električni naboј i uglavni moment kolapsirale materije, a "zaboravlja" sve ostalo je u tome što su te tri veličine povezane sa poljima dugog dometa: u slučaju naboja sa elektromagnetskim, a u slučaju mase i uglovnog momenta sa gravitacionim.

Eksperimenti R. Dikija sa Prinstona i V. Braginskog sa Moskovskog Univerziteta su pokazali da ne postoji polje dugog dometa povezano sa kvantnom osobinom nazvanom barionski broj /barioni su klasa čestica koja uključuje i proton i neutron/. Stud crne rupa formirana od kolekcije bariona zaboravlja svoj barionski broj i rađa jednak broj bariona i antibariona. Tako, kad crna rupa ispari, ona narušava jedan od naj-

slavljenijih zakona fizike elementarnih čestica, zatim konservacije barionskog broja.

Iako Bekenštajnova hipoteza da crna rupa ima konačnu entropiju zahteva zbog svoje konzistentnosti da crna rupa termalno zrači, na prvi pogled izgleda kao potpuno čudo da detaljno kvantomehaničko izračunavanje stvaranja čestica daje za emisiju termalni spektar. Objašnjenje je u tome da emitovane čestice tuneliraju iz regiona za koji spoljašnji posmatrač nema drugog znanja sem o masi, el. naboju i uglovnom momentu. To znači da su sve konfiguracije ili kombinacije emitovanih čestica koje imaju istu masu, naboju i uglovni moment jednako verovatne. Zaista, moguće je da crna rupa emituje televizor ili sabrana Prustova dela u 10 kožno povezanih tomova, ali broj konfiguracija koji odgovara ovim egzotičnim mogućnostima je iščezavajuće mali. Daleko najveći broj konfiguracija odgovara emisiji sa spektrom koji je približno termalan.

Emisija iz crnih rupa ima dodatni stepen neodređenosti ili nepredviđljivosti iznad onog koji se normalno pojavljuje u kvantnoj mehanici. U klasičnoj mehanici može se predvideti rezultat merenja i pozicije i brzine čestice. U kvantnoj mehanici princip neodređenosti kaže da se samo jedno od tih merenja može predvideti, ali ne obe. Alternativno, može se predvideti rezultat merenja neke kombinacije položaja i brzine. Tako je posmatračeva sposobnost da čini predviđanja efektivno prepovoljena. Kod crne rupe situacija je još gora. Pošto emitovane čestice dolaze iz regiona o kome posmatrač ima veoma ograničeno znanje, on ne može da predviđa ni položaj ni brzinu čestice, niti neku njihovu kombinaciju. Sve što može da predviđa je verovatnoća da će izvesne čestice biti emitovane. Tako, izgleda da je Ajnštajn dvostruko pogrešio kada je rekao da "Bog ne bacá kockice". Razmatranje emisije čestica iz crnih rupa izgleda da sugeriše da Bog ne samo što bacá kockice, nego ih ponekad bacá tamu gde se ne mogu ni videti.

Preveo: S. Borgovski

ZAŠTO JE GVOŽĐJE MAGNETIČNO?

Dugo čekamo objašnjenje porekla feromagnetizma koje će sadržati interakcije među vezanim elektronima kao i interakcije između slobodnih i vezanih elektrona i koje će pomoći u traganju za novim magnetičnim supstancama.

Mary Beth Stearns

Poreklo magnetizma u gvožđu, kobaltu, niklu i njihovim legurama bilo je ispitivano tokom mnogo godina, zato što je struktura valentnih elektrona u prelaznim metalima vrlo kompleksna. Tek je poslednja decenija dovela do razumevanja osnovnih karakteristika feromagnetizma. Danas su poznata dva osnovna uslova koje elektronska struktura metala mora da zadovoljava da bi on bio feromagnetik; to omogućuje pravljenje novih magnetnih legura.

Kod 3d prelaznih metala valentni elektroni su: 4sp provodni elektroni, tzv. "slobodni" elektroni, ili samo s-elektroni - 3d elektroni. Svojstva i interakcije baš ovih 3d-elektrona su ključ za razumevanje feromagnetizma. Kao što je poznato iz kvantne mehanike valentni elektroni imaju odredjenu samo gusatinu verovatnoće da budu u datom stanju; u ovom smislu treba shvatiti podelu na s, odnosno d-elektrone. Pored toga, pošto čvrsta tela nemaju sfernu simetriju, klasifikovanje valentnih elektrona prema ovoj simetriji nije sasvim dobro, mada ima izvesne vrednosti i često se koristi. Odstupanje od ovih orbita nameće potrebu za "hbridizacijom", ili "mešanjem stanja".

Srećom, jedan aspekt magnetskog ponašanja Fe i ostalih 3d elemenata je naročito jednostavan. Obzirom da se 3d elektroni nalaze na spoljnim ivicama atoma, njihovi orbitalni angularni momenti su veoma oslabljeni usled postojanja kristalnog polja.* Tako kod 3d elemenata, nasuprot lantanidima, magnetne momente u osnovi izaziva samo njihov elektronski spin. O slobodnim atomima koji imaju nesparene spinove dosta se zna. Takav fenomen, da je stabilno stanje atoma ono sa maksimalnim spinom, sledi direktno iz kvantne mehanike i Paulijevog principa zabrane, i poznat je kao Hundovo pravilo. Ipak, kod metala nije tako česta pojava nesparenih spinova ili momenata. Tako se za objašnjenje feromagnetizma postavljaju dva vežna pitanja:

- Zašto i kako individualni atomi stvaraju momente?
- Zašto se svi ti momenti orijentišu duž iste linije?

PRVE TEORIJE

Jos od prvih dana kvantne mehanike (oko 1930.) postojala su dva različita pristupa ovom problemu. Revijalno izdanje Gony Herringa⁴ daje pregled članaka do 1966. Prvi model je bio zasnovan na radovima Wernera Heisenberga i Hansa Bethea. U njemu se prepostavlja da su d-elektroni potpuno lokalizovani (d₀-elektroni), tj. da ih pojedinačni atomi snažno privlače, njihovi spinovi su paraleleni je izmenska interakcija susednih atoma sa težvim spinovima smanjuje ukupnu energiju sistema. Ovo je bila neka vrsta međuatomskog Hundovog pravila za interakcije. Tada se talasne funkcije nisu dobro poznavale pa je ovaj model bio više kvalitativan.

No, nekoliko eksperimentalnih činjenica bilo je u suprotnosti sa ovako pojenostavljenim prilazom. Najubedljivije su bile:

- Momenti Fe, Co i Ni nisu celi brojevi; oni su respektivno

* Naime kristalno polje je u spoljnim orbitama atoma dovoljno jако da naruši i izmeša atomske angulare momente.

2,2 , 1,7 , 0,6 Borovih magnetora.

- Vrednosti specifičnih toplota Fe, Co i Ni na niskim temperaturama su previsoke da bi bile izazvane s-elektronima (za koje se znalo da postoje), što je sugerisalo postojanje drugih provodnih elektrona.

Godine 1960. ovaj model, potpuno lokalizovanih elektrona, su konačno oborili R. Stuart i Walter Marshall, kada su napravili kompjuterski proračun direktne izmene između lokalizovanih London-Heitlerovih talasnih funkcija. Proračun je pokazao da je ova interakcija premala da bi izazvala feromagnetizam. Svi kasniji slični računi doveli su do istog zaključka.

Drugi prilaz, do kaoga su takođe u ranim 30-tim godinama došli Felix Bloch, Ya. I. Frenkel, Edmund Stoner i mnogi drugi, pretpostavlja je da su svi valentni elektroni, i 3d i 4sp, slobodni, tj. da mogu slobodno da se kreću kroz kristalnu rešetku. Ova pretpostavka je na nesreću tako komplikovana da ni jedan kvantitativni rezultat nije dala.

Nedjutim, mnoge eksperimentalne činjenice su govorile protiv modela sa potpuno slobodnim elektronima. Najočitije su:

- Entropija prelaza (kroz Kirijeve temperature) iz magnetskog u nemagnetsko stanje ukazuje na to da Fe i Ni poseduju stepene slobode zahvaljujući lokalnim momentima.
- Merenja magnetnog form-faktora pokazuju da magnetni elektroni imaju zapreminsку raspodelu vrlo sličnu onoj u slobodnim atomima.
- Magnetni momenti iznad Kirijeve teperature postoje i skoro su isti kao niskotemperaturni momenti zasićenja.
- Elektronska struktura se ispod i iznad Kirijeve temperature bitno ne razlikuje, a u modelu slobodnih elektrona bi trebalo da bude različita.

Eksperimentalna situacija može da se sumira konstatacijom da eksperimenti koji ispituju osobine blizu jezgra, kao što je rasejanje neutrona i hiperfina polja, uglavnom mere lokalizovane elektrone, dok oni eksperimenti za koje su važni "repovi" talasnih funkcija, kao pri merenjima transportnih fenomena, vide samo slobodne elektrone.

Poslednjih godina se mnogo govorilo o tome da su ova dva pristupa ekvivalentna. To je zato što matematička osnova lokalizacije, delta funkcija, može da se izradi kroz potpuno slobodne funkcije, sinus i kosinus, što znači da sa jedne ekstremne tačke gledišta nema razlike. Međutim, pri čisto matematičkim formulacijama je vrlo teško dobijenim rezultatima pridružiti fizička tumačenja, posebno pri vrlo složenim problemima, kao što je ovaj. Pošto je fizika, kao disciplina, zasnovana na eksperimentu, često je korisnije davati ideje vrlo bliske realnosti; ovaj problem se može formulirati na način koji je vrlo usredstavljen na dominantne interakcije. Zato po mojem mišljenju treba prihvati obe ove teorije. U daljem tekstu one će biti još više specifikovane.

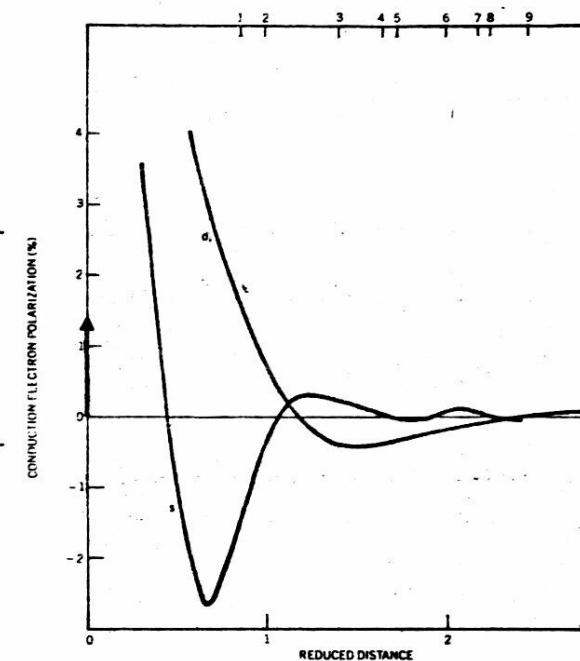
Početkom pedesetih godina Clarence Zener je predložio nešto drugačiji model koji je spojio obe teorije. On je pretpostavio da su d -elektroni lokalizovani i da polarizuju provodne s-elektrone, koji zatim urađuju atomske spinove. On je predviđao da su ovi slobodni elektroni ravnomerno pozitivno polarizovani. (ovde pozitivno znači - u istom smeru kao lokalizovani d -elektroni.) Mnogi naučnici su vrlo brzo posle toga došli do zaključka da s- d izmenska polarizacija prouzrokuje oscilatornu prostornu polarizaciju provodnih elektrona koja sa povećanjem rastojanja od lokalizovanog momenta vrlo brzo opada (SL. 1). Ove polarizacije provodnih elektrona danas se označavaju kao EKKY (Ruderman-Kittel-Kasuya-Yosida) oscilacije. U 1960-oj, pošto je pokazano da ječisto elektronsko lo-

kalizovanje slabo da izazove feromagnetizam, EKKY teorija s-d interakcije postala je omiljeno tumačenje feromagnetizma.

SLIKA 1

Promena položaja, sa rastojanjem izraženim u jedinicama konstante rešetke polarizacije provodnih elektrona u gvožđu.

Strelica predstavlja spin lokalizovanih d -elektrona. S-kriva pokazuje merenu polarizaciju provodnih elektrona - sličnih 4s-elektronima, koja je negativna za prva dva suseda; d: krviz je hipoteitična polarizacija provodnih elektrona, sličnih s-elektronima za feromagnetsko kuplovanje; prvi presek krive mora biti iza najbližeg suseda.



POLARIZACIJA PROVODNIH ELEKTRONA

Početkom 60-ih godina omogućeno je merenje polarizacije s-elektrona pomoću Mössbauerove i nuklearno magnetskih rezonantskih tehnika. Zbog zanemarljivih doprinosa orbitalnih momenata u Fe, Co i Ni, ovakvi eksperimenti mere uglavnom unutrašnje elektrone, a to su s-elektroni. Koristeći razblažene legure Fe, u kojima su neki rastvorci delovali kao magnetne rupe (Al i Si),

ja sam pokazala da je moguće posmatrati gubljenje magnetnog momenta atoma Fe u njihovoј neposrednoj okolini. Struktura spektra ovih susednih Fe atoma zavisi od polarizacije s-elektrona; zato se analizom ovih spektara može dobiti raspodela polarizacije u prvih nekoliko slojeva atoma.

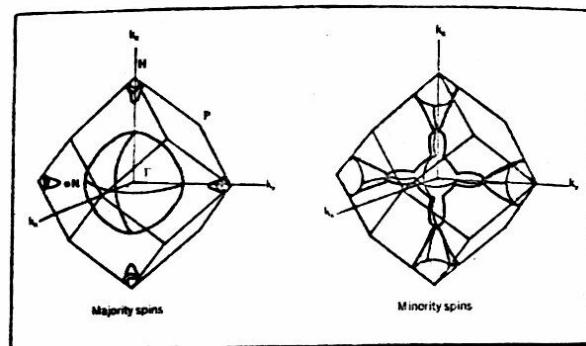
Važan rezultat ovih eksperimenata bio je da je polarizacija s-elektrona u prva dva sloja negativna. (Slika 2) Sledi, polarizacija s-elektrona na rastojanju najbližeg suseda atoma je suprotnog smera od polarizacije atoma, tj. Fe atomi teže da se uređe antiferomagnetski.

SLIKA 2

Permijeva površ gvožđja utvrđena de Haas-van Alphen-ovim merenjima. Džepovi elektrona i šupljina duž k_x -ose su baš kao i cilindrične površi između H i N postale nejasne.

Od A.V. Gold-a i sarađnika.

Referenca 4.



Pošto su pretpostavke da su direktna interakcija lokalizovanih d_g -elektrona ili kuplovanje preko s-like elektrona uzrok feromagnetizmu, oborene, ja sam pretpostavila da se d_g -elektroni kuplju preko malog broja slobodnih d_g -elektrona. RKKY teorija kaže da se negativna polarizacija s-like elektrona na rastojanju najbližeg suseda ostvaruje zato što Fe ima prenomo 4s elektrona, oko jedan elektron po atomu. Oblik polarizacije provodnih elektrona oko lokalnih momenata je funkcija

$\cos(2k_Fr)$ i $\sin(2k_Fr)$, gde je k_F talasni vektor na Fermijevoj površi. Zato je u prvom čvoru zadovoljeno $k_Fr = \text{const.}$ Pošto k_F zavisi od broja provodnih elektrona, ako je k_F (tj. broj slobodnih elektrona) dosta veliki, r je malo, i prvi čvor je na rastojanju manje od udaljenosti najbližeg susednog atoma. Pogodno modifikovana RKKY teorija je primenljiva i na d_g provodne elektrone. Zato je vrlo presto proceniti koliko d_g provodnih elektrona treba da bude prisutno za feromagnetsko kuplovanje: prvi uslov je da je prvi čvor iz rastojanja najbližeg suseda.

Gornja granica broja d_g elektrona, određena na ovaj način iz RKKY teorije, je oko 0,4 d_g elektrona na atom. Sledi da najviše do 5/6 d_g -elektrona mogu biti slobodni u Fe, Co i Ni. Pošto d_g elektroni imaju simetriju vrlo sličnu onoj koju imaju d_{eg} -elektroni, d_g - d_{eg} kulonska izmenjska interakcija je dosta jača od s - d_g interakcije, što izaziva feromagnetizam kod Fe, Ni. Daajući koliko d_g -elektrona se očekuje, počela sam sa trudnim direktnim dokazem o broju d_g -elektrona. Kao i obično, kada se postavi pravilno pitanje, lako se nađe odgovor.

SLIBOANI d_g -ELEKTRONI: SAMO NAKOLEMO

Najdirektniji dokazi da je broj slobodnih d_g -elektrona mali dolaze iz tri izvora, to su: de Haas-van Alphen, spin-polarizaciona merenja i prorubni zonskih struktura.

U de Haas-van Alphen-ovom eksperimentu de Haas-van Alphenov efekat meri oblik i veličinu Fermijevе površine (granicu između popunjenoj i praznog provodnog stanja elektrona u prostoru talasnog vektora). Tako, ovi eksperimenti daju meru broja provodnih elektrona. Slika 2 pokazuje Fermijevе površine Fe za obe mogućnosti spinova.

Krive duž k_z -ose i cilindričnih površi, izmedju tačaka Γ i N su izostavljene zbog preglednosti. Nada se za centralne sferne površi u početku smatralo da su s-tipe, danas je jasno da su to elektroni d_{\downarrow} ; s-elektroni su nužno nepolarizovani, a ove su površi polarizovane oko 90%. Izmerene vrednosti k_z odgovaraju veličinama od 0,2 elektrona sa spinom nagore i 0,01 sa spinom nadole, i oklično se slažu sa uslovom da za feromagnetsko kružovanje čvor polarizacije mora biti dovoljno daleko.

Skorašnja spin-polarizacijska merenja tunel-efekta izmedju feromanetika i superprovodnog Al, izdvojenog preko oksidnog taloga, takođe su potvrdila mali broj d_{\downarrow} elektrona. Ovi su eksperimenti, uglavnom, merili broj veoma pokretnih elektrona unutar 1meV Fermijeve površi. Kao što se vidi sa sl.3, ovo su obavezno d_{\downarrow} elektroni, na Fermijevoj površi ima vrlo malo s-elektrona. Iz eksperimenata drugih tipova mnogo je očiglednije da s-elektroni imaju jako malu polarizaciju, dok su merene tunelling polarizacije visoke (u Fe oko 44%) i izvanredno se slažu sa polarizacijom d_{\downarrow} elektrona na Fermijevoj površi za Fe, Co, Ni i njihove legure.

Preračuni zonskih struktura po svoj prilici će dati realan opis osocina spoljašnjih valentnih elektrona; međutim, oni su stalno razvojnom stadijumu kada se sumnja u njihovu tačnost i moguća tumačenja. Zato oni daju samo osnovne strukturne karakteristike: Slika 3 je rezultat jednog ovakvog proračuna zonske strukture Fe. Grafici pokazuju spin nagore i spin nadole zonske energije u zavisnosti od talasnog vektora k . Na slici su lokalizovani elektroni predstavljeni ravnim linijama, a slobodni elektroni paraboličnim, jer je $E = \frac{h^2 k^2}{2m^*}$, gde je m^* efektivna masa.

Na sl. 3 se stvarno i vidi ponašanje e . Fermijeva energija E_F je uzeta za nulu. Razmotrimo okolinu centra Γ Brillouin-ove

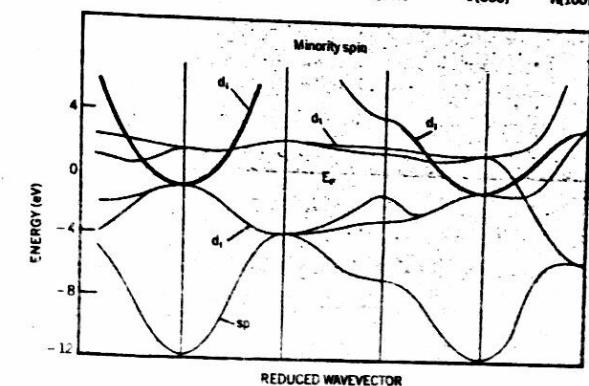
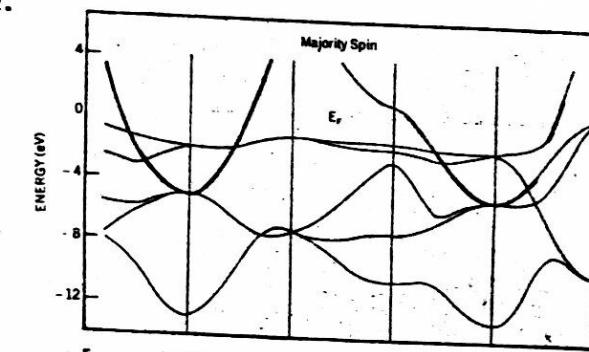
zone (jedinična čelija u k-prostoru). Ovde je najniže stanje $E=12$ eV zahvaljujući s-like provodnim elektronima; ono je parabolično oko Γ . Pet najviših stanja su d-stanja. Za svaki spin četiri stanja su skoro ravna oko Γ , dok je jedno, počano na slici, parabolično. Idući od Γ duž pravca (110) ka N , ili duž (111) ka P , vidimo da četiri zone izgledaju dosta ravno. Slaba zakrivljenost ovih zona može da se pripiše hibridizaciji izmedju d_{\downarrow} i s-zone. Parabolična zone (pojačane na sliči) odgovaraju slobodnim d_{\downarrow} e . Ove zone izgleda kao da presecaju Fermi nivo E_F u pravcu F , P i N (iz Γ) sa gotovo nikakvom hibridizacijom sa s-like elektronima, i imaju krivinu kose odgovara slobodnoj e -masi. Iz njihovih vrednosti k na Fermi-nivou možemo da izračunamo broj d_{\downarrow} elektrona. Nalazimo 0,34 i 0,0054 elektrona, u razumnom slaganju sa de Haas-van Alphen-ovim merenjima na slici 2.

SLIKA 3

Zonska struktura gvožđa pokazuje zavisnost zonskih energija za spinove nagore i spinove nadole od talasnog vektora.

Od K.J. Duff-a i T.P. Das-a.

Referencija 6.



UNUTAR-ATOMSKI IZMENSKI KRITERIJUM

Podela na d_5 i d_4 elektrone sada može da se izvrši i kvantitativno. Par lokalizovanih elektrona sa paralelnim spinovima ima nižu energiju od para elektrona sa antiparalelnim spinovima za vrednost nazvanu unutar-atomsku izmensku energiju U . Njena veličina je oko 1,5 eV po spinu za 3d elemente.⁷ Sledi, prirodan kriterijum za lokalizaciju zone je da je njena širina manja ili jednaka U . Pod ovim uslovom neki elektrone ostaju u atomu dovoljno dugo da interaguju i raspodele duž pravca svoje spinove, tako da atom stiče moment. Zonski proračuni za Fe daju da je širina zone (energija je raspodeljena duž Brillouin-ove zone) kod gornje d zone oke 0,7 eV, tako da ispunjava ovaj uslov. Ipak, ovaj kriterijum uključuje formiranje samo lokalnih momenata. Za feromagnetizam mora biti ispunjen još jedan dodatni uslov: d_5 elektrona mora biti dovoljno da bi se ostvarila raspodela njihovih momenata po pravcu. Kao što se vidi sa sl.3, širine zona slobodnih elektrona su mnogo veće od U . Za s i d₅ elektrone širine su oko 10 eV.

Ova slika lako objašnjava magnetno ponašanje svih 3d prelaznih elemenata i njihovih legura. Na početku 3d grupe atomski broj je mali pa su svi d-elektroni slobodni. Sa povećanjem atomskog broja neki elektroni postaju čvršće vezani uz jezgro i širine njihovih zona se smanjuju. Poznato je da su kod elemenata do Cr s i d₅ elektroni slobodni (Magnetsko stanje Cr je mnogo neobičnije od feromagnetizma. Cr ima posebno SPIN-DEENSITY-WAVE-GROUND stanje provodnih elektrona koje se u kristalu ne može izmeriti, a posledica je neobične konfiguracije Fermijevih površi. Merenja specifične toplice pokazuju da u Cr nema lokalizovanih momenata⁸).

Prvi element 3d grupe sa lokalizovanim d-elektronima je Mn. Međutim, kao što se može očekivati, Mn ima još uvek previše

slobodnih d-elektrona i zato je antiferoemagnetičan.

Gvožđje je prvi 3d element koji ispunjava kriterijume za feromagnetizam. Co i Ni, sa čak nekoliko d₅, još su "bolji" feromagnetičari. Ovo se vidi u njihovom ponašanju u legurama: npr. Ni legiran 3d elementom koji mu je levo u periodnom sistemu kao Cr ostaje feromagnetički u većem intervalu promena nego Fe. Ovo je tako jer je feromagnetizam određen izmerenom srednjom vrednošću d₅ elektrona. Ponašanje srednjih momenata 3d legura (Slater-Pauling kriva) sledi prirodno iz ovog modela.

Nastajanje lokalizovanih stanja u 3d grupi može lepo da se vidi u linearnoj konfiguraciji $3p \rightarrow 3d$ prelaza ($M_{1,2}$) ovih elemenata. Linearne konfiguracije koje nastaju usled prelaska elektrona sa 3p nivoa (oko 50 eV ispod E_F) na prazan 3d nivo iznad E_F su merena preko apsorpcije X-zraka i gubitka energije elektrona⁹ - poslednji rezultati su prikazani na sl. 4.

Linearne konfiguracije Cr izgleda mnogo drugačije nego linearne konfiguracije od Mn do Ni; to je karakteristično za nastajanje praznih provodnih ili slobodnih zona. Nasuprot tome, linearne konfiguracije od Mn do Ni imaju antiresonantnu (ili Fano) linearnu konfiguraciju, koja se sastoji od negativnog udubljenja i pozitivnog pika. Ovakva linearna konfiguracija je tipična za lokalizovan nivo kad postoji interferencija lokalizovanog stanja sa kontinualnim fonom. U ovom slučaju fon nestaje zbog elektronskih prelaza iz 3d stanja u viša P stanja.

OBLIK d POLARIZACIJE

Na nesreću, ne postoji metoda merenja polarizacije provodnih d-elektrona koji bi bio tako direkstan kao merenja s polarizacije preko hiperfinih polja. Ipak, talasne funkcije d₅ elektrona, kad su doista unutar atoma, su vrlo slične atomskim pa je doprinos polarizacije d₅ elektrona magnetnom momentu atoma ne-

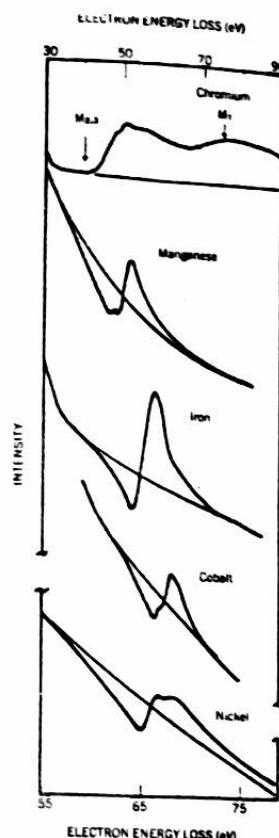
li. Sledi, kada je strani prelazni element zamenjen u rešetku feromagnesnog elementa, direktna indikacija polarizacionih perturbacija izazvanih d-elektronima atoma primesa je mala perturbacija momenta u deobnim atomima rešetke.

SLIKA 4

Tipični transmisioni spektar za gubitak energije u monokristalima usled $2p \rightarrow 3d$ prelaza.

(Uočiti promenjenu energijsku skalu za Ni) Glatke krive odslikavaju kontinualni fon ekstrapolisan od dalje oblasti.

Strelice pokazuju očekivane položaje $3p \rightarrow 3d$ ($M_{1,2}$) i $3s \rightarrow 3d$ (L_4) prelaza.



Ove perturbacije su uočene u eksperimentima dva tipa:
-Analiza spektara hiperfinog polja i podaci magnetske saturacije primesa prelaznih metala Fe daju perturbacije Fe atoma

koji okružuju primesni atom.⁹

- Neutronski poprečni preseci kao funkcije talasnog vektora, dlibjeni iz difuznog elastičnog rasejanja, daju Purjejeve inverze momenta perturbacije.⁴⁰

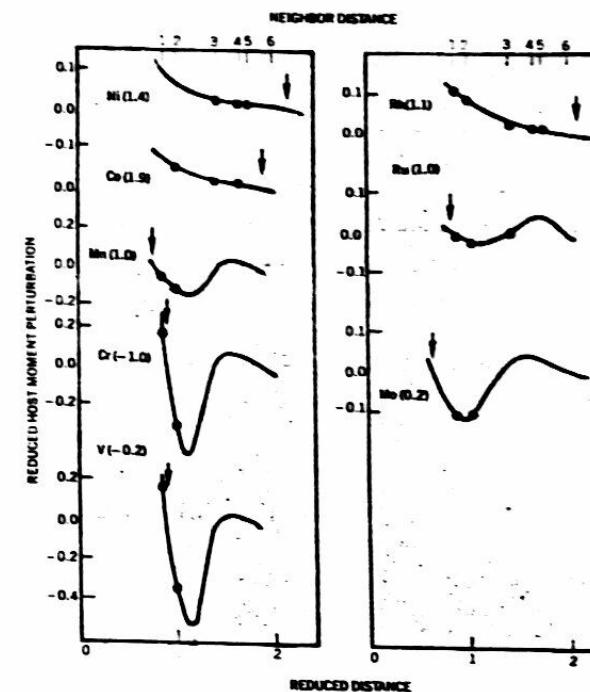
Resultujući momenti perturbacija posmatrani preko ova dva metoda se dobro slažu; za rešetku Fe su prikazani na sl. 5.

Slika 5

Perturbacije magnetskog momenta u atomima gvožđa, koji su domaćini i koji okružuju atom rastvorenog prelaznog metala.

Brojevi daju momenat rastvora u Fe, u Borovim magnetonima.

Strelice pokazuju čvorove.



Pošto je momenat perturbacije u Fe blisko povezan sa polarizacijom provodnih elektrona, očekujemo da se prvi čvor polarizacije, sa porastom broja d₅-elektrona, sa većim rastojanjem pomera na rastojanje prvog najbližeg suseda u rešetki. Ovakvo ponašanje se vidi na sl. 5, gde je nacrtana i strelica koja po-

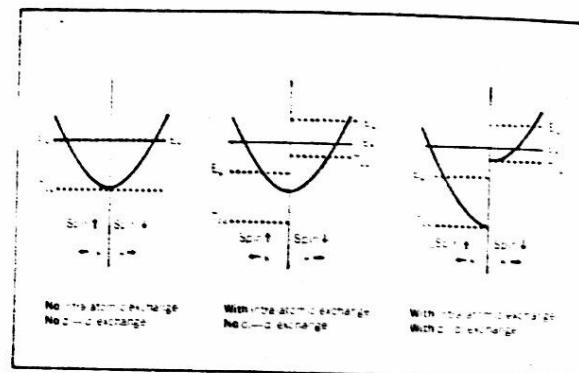
kazuje ove čvorove. Saglasna sa slikom polarizacionog ponašanja je i činjenica da su momenti u Cr i V a orijentisani antiferomagnetski; to je zbog velikog broja d_5 elektrona.

Videli smo da za feromagnetizam moraju da budu ispunjena dva uslova. Ova dva uslova mogu da se zgodno prikažu slikom 6. Prvi dijagram predstavlja uprošćenu strukturu za hipotetično "paramagnetično Fe" (to nije normalno Fe iznad Kirijeve temperature), za koju je useto da nema umuter-atomskih kulonskih izmenjskih interakcija između d_5 i d_5 elektrona. Ravne zone predstavljaju d_5 elektrone; parabolične d_5 elektrone. U ovom slučaju Fermijev nivo je negde na vrhu dva nivoa, označen sa E_F .

SLIKA 6

Schematska reprezentacija interakcija i uslova koji doprinose feromagnetizmu u Fe.

Detaljno objašnjenje slike je u tekstu.



Prvi uslov za feromagnetizam je postoji nekoliko lokalizovanih elektrona koji ispoljavaju momente. Pošto smo pretpostavili da su neki d -elektroni lokalizovani, ovaj uslov je ispunjen ubacivanjem unutaratomske izmenjske interakcije. Ovo cepe lokalizovana spin-nagore i spin-nadole stanja i ispoljavanje lokalizovanih momenata, kao što je pokazano na slici, na sred-

njem dijagramu slike. Unutaratomska izmenjska interakcija ne polarizuje d_5 elektrone, što je pokazano činjenicom da elementi koji imaju samo slobodne valentne elektrone (Cr, V, Ti, Se i svi elementi sa sp valentnim elektronima) ne ispoljavaju momente. Lokalni momenti moraju biti prisutni za feromagnetizam.

Dруги uslov je ispunjen ubacivanjem d_5-d_5 izmenjske interakcije i postojanjem samo nekoliko d_5 elektrona po atomu. Ubacivanje d_5-d_5 interakcije polarizuje d_5 elektrone kao što je pokazano na desnom dijagramu sl.6. (uočite da ovaj dijagram vrlo dobro odgovara stvarnoj zonskoj strukturi Fe prikazanoj na sl.3. Uporedite, npr. d zone od Γ ka P na sl.3. sa Γ zonama nacrtanim levo.) Broj d_5 elektrona određuje prostornu raspodelu d_5 elektronske polarizacije i kuplovanje lokalnih momenata feromagnetski, odnosno antiferomagnetski. Ako postoji različiti tipovi provodnih elektrona oni sa najvećom polarizacijom određuju kolektivno magnetno stanje u toj oblasti. Da bi se pojavio feromagnetzam, broj provodnih elektrona mora biti dovoljno mali da polarizacija u oblasti prvega čvora rešetke буде pozitivna. U 3d feromagneticima d_5-d_5 kulonovska interakcija je mnogo veća od $s-d_5$ interakcije te je polarizacija d_5 provodnih elektrona dominantna.

LEGURE

Primena ovog modela daje uvid u pomašanje magnetnih legura. Sposobnost polarizacije provodnih d -elektrona, koja određuje magnetske osobne danas može da se vidi i kontroliše kod niza legura. Binarane legure prelaznih elemenata su jednostavne i predstavljaju već klasične primere magnetskih pomašanja. Pomašanje kompljednijih legura (kao što su Heusler-ove legure između lantanida i prelaznih metala i aktinidne legure) može se takođe razumeti sa ovog gledišta. Primena ovog modela pravljene je magnetskih materijala tačno određenih osobina.

LITERATURA:

1. C. Herring, *Magnetism*, volume IV (G. T. Rado, H. Suhl, eds.) Academic, New York (1966).
2. M. A. Ruderman, C. Kittel, Phys. Rev. **96**, 99 (1954); T. Kasuya, Prog. Theor. Phys. **16**, 45 (1956); K. Yosida, Phys. Rev. **106**, 893 (1957).
3. M. B. Stearns, Phys. Rev. **129**, 1136 (1963); **147**, 439 (1966); Phys. Rev. B **4**, 4069 and 4081 (1971); **8**, 4383 (1973).
4. A. V. Gold, L. Hodges, P. T. Panois, D. R. Stone, Int. J. Magn. **2**, 357 (1971); D. R. Barratt, Phys. Rev. **8**, 3439 (1973).
5. P. M. Tedrow, R. Merservey, Phys. Rev. B **7**, 518 (1973); M. B. Stearns, Jour. of Mag. and Mag. Mat. **5**, 167 (1977).
6. K. J. Duff, T. P. Das, Phys. Rev. B **3**, 192 and 2254 (1971); S. Wakoh, J. Yamashita, J. Phys. Soc. Japan **21**, 1712 (1966); R. A. Tawil, J. Callaway, Phys. Rev. B **7**, 4242 (1973).
7. M. B. Stearns, S. S. Shinotsaki, Physica B **86-88**, 1195 (1977).
8. A. W. Overhauser, Phys. Rev. **128**, 1437 (1962).
9. M. B. Stearns, Phys. Rev. B **13**, 1183 (1976).
10. M. F. Collins, G. G. Low, Proc. Phys. Soc. Lond. **86**, 535 (1965); J. Phys. (Paris) **25**, 596 (1964); M. B. Stearns, L. A. Feldkamp, Phys. Rev. B **13**, 1198 (1976). □

Iz časopisa "Physics Today", prevela Maja Marinković,
student II godine fizike.



Dirakov metod. Ako usvojimo kao alternativu postojanju divljih lavova u Sahari, nepostojanje divljih lavova u Sahari, onda u njoj mogu postojati samo pripitomljeni lavovi. A lov na pripitomljene lavove nije problem teorijske fizike.

FIZIS 24

april, 1979

ERIH fon PETKO vam predstavlja (KAKADUOZA)

ARISTOTEI I NJUTIN
AJNŠTAJN I LENJINDragomir P. Cvetković
prof. u penziji

Ako je Ajnštajnu sve jedno, nije fizici.

ARISTOTELO - NJUTIN

Često puta čovek mora da se zaprepasti što se dugo mogu da održe očigledne zablude, čak i u naući.

Tako na primer za Njutnov zakon inercije uzima se kao empirijski dokaz slučaj što se telo trsa unazad kad kola podju napred.

Ustvari telo koje miruje u kolima, miruje usled ravnoteže sila, koje deluju na njega, a ne po inerciji. Tako se lakinim primerima ovaj zakon održava kroz istoriju.

Jednako prevoljnijsko kretanje na Zemlji moguće je samo pod dejstvom jedne sile, a to je rekao Aristotelo, nasuprot Njutnu, za koga su moguća ova kretanja i bez dejstva sile – inercijalna kretanja, dok je Njutin mističan.

Slično, kod horizontalnog hica gravitacione linije ne idu paralelno, nego pod ugлом, pa slika dešavajuće inerciju.

AJNŠTAJN - LENJIN

Ajnštajn je postavio teoriju relativiteta prostora i vremena.

1) Ako imamo dva tela u vasiioni, pa se jedno od njih kreće, a drugo miruje, za Ajnštajna je svejedno da li ćemo tvrditi da se kreće

telo A, a B da miruje i obratno. Jeste, ali za fiziku nije.

2) Ako uzmemo dva solenoida jedan sa većim, a drugi sa manjim brojem navojaka, koji se nalaze u magnetnom polju (a cela vasiona je u magnetnom polju) nije svejedno da li ćemo uzeti da se kreće solenoid sa većim brojem navojaka ili onaj sa manjim, jer će se u njima indukovati el. struja i magnetna polja različitih intenziteta, a svako telo sa svojim atomima predstavlja solenoid i u sebi indukuje električnu struju (vrtložne struje) kretanjem u magnetnom polju, i van sebe obrazuje magnetno polje menjajući time svoj otpor - masu.

3) Ako se uzme da je svejedno da li se nebeski svod okreće oko Zemlje (Ptolomej) ili Zemlja oko svoje osovine (Kopernik), onda se ne može objasniti spljoštenost zemlje na polovima centrifugalnom silom.

Topšte centrifugalna sila bi bila puna misterija kao i gravitaciona što je:

Ako bi bilo svejedno tvrditi da telo A miruje, a centar O da se okreće oko svoje osovine i obrnuto, onda bi proizilazilo da centrifugalna sila tela A proizlazi iz njegova čista mira, a to se protivi zakonu o održavanju energije.

Povećavanje i skraćivanje dužine tela, povećanje njegove mase ili usporavanje fizičko hemijskih procesa isključivo kretanjem (a ne kao kod mene usled presecanja linija sila polja ili dejstvom voza na šine kada preko njih predje) je čista misterija u Ajnštajnovom sistemu.

U Ajnštajnovom prostoru nije moguće za jedno telo tvrditi da se kreće bez poredjenja sa drugim telom, u fizičkom prostoru to je moguće iz indukovane struje u telu. Time je fizika oborila Ajnštajna.

Za Ajnštajna je svejedno koji ćemo dogadjaj uzeti da se desio pre, a koji posle, jer se vreme kombinuje relativitetom prostora, ali za fiziku to nije svejedno, jer ona operiše pojmovima o uzroku i posledici i zakonom o održanju energije, pa je nemoguće tvrditi da je energija potečla od posledice: naime da vatra dobija svoju energiju od vode koja vri. Sama materija luči iz sebe svoj prostor u vidu struktura

(strukturne formule) i svoje vreme kao svoje fizičke i hemijske procese, nezavisno od naših satova koji se ne podudaraju, a zavisno od zatvarača svojih unutrašnjih procesa: Šećer u listu nije proisveo svetlost, ugljendioksid i vodu, nego obrnuto. I sto taj red u procesima materije je vreme koje mi saznamo ne satovima, nego preko zakona o ovim procesima. I to je objektivno vreme.

Pri ovome rukovodeći princip nije: "Post hoc, ergo propter hoc" nego energija uzroka proizvodi posledicu - što se iz posledice ne može da proizvede uzrok: iz eksplozije metana, nemože da se proizvede metan. Tako vreme postaje duboka intimnost materije, tako se ono kao i prostor pretvara u materiju.

Približno jednovremeno se zbila manja i grmljavina, međutim ja prvo vidim munju, pa onda čujem grmljavu, to nije nikakva relativnost vremena, nego prosta činjenica da svetlost ide brže od zvuka.

Ajnštajnova teorija konsekutivno izvedena unosi opšti relativitet u svet, jer ako proučimo karakteristiku kojom se Ajnštajn služi da odredi relativnost prostora i vremena, videćemo da će moje naći svuda: relativno je i to što će se pasulj brže skuvati, kad je bliži vatri, nego kad je dalji od nje. Ali svet od ove relativnosti neće da pravi teoriju i filozofiju sveta.

U takvom filozofskom sistemu svet bi arljao u ludilo, od kojeg bi bila sačuvana samo čisto refleksna bića kao na primer gliste.

Ajnštajn je u svome sistemu nekonsekventan. U fizičkom prostoru verovatno ne samo da postoje tačke koje u odnosu jedna na drugu ne miruju, nego nije u miru nijedna usamljena tačka u vasioni; koordinatni sistem nema ni trenutka stalnosti: koordinatni početak mu se stalno pomera a apsisa i ordinata produžuju i skraćuju i to ne relativno.

Evo šta kaže Lenjin: "... Idealistička pozicija u ovom pitanju (prostora i vremena) može se stvarno prebroditi, samo ako se prima objektivna realnost prostora i vremena... Naše saznanje i naše iskustvo se sve više približuju objektivnom prostoru i vremenu održavajući ih sve

pravilnije i dublje." (Lenjin: "Izabrana dela") (7).

Ovom raspravom sam pokušao da učinim jedan korak ka tome.

Ipak Ajnštajnova teorija nije uzalud došla, pobijajući je mi dublje upoznajemo svet. Ona može da ukaže na izvesne greške u našem saznanju ali ni u kom slučaju nije sistem i filozofija sveta.

Satove treba prilagodjavati procesima u prirodi, a ne obrnuto.

Da bi kod ovih protivurečnosti održao svoju teoriju, Ajnštajn je promenio pojam "sile" kao devojka koja seče petu da bi obukla balsku cipelu.

Uostalom Ajnštajn pada zajedno sa Kjutno na pitanju "inercije".

- Nije moguće da čak i vi verujete da potkovica zaista donosi sreću? - začudio se jedan od prijatelja Nilsa Bora, kad je video potkovicu zakucanu iznad ulaznih vrata njegove kuće.

- Naravno da ne verujem - odgovorio je veliki naučnik - ali primetio sam da potkovica donosi sreću i kad u nju ne verujes.

- . -

Albert Ajnštajn je često držao predavanja na raznim univerzitetima. Jednom prilikom, baš kad se vozio na jedno takvo predavanje, njegov šofer mu reže:

- Profesore, toliko sam već puta služao ovo vaše predavanje da bih i sam mogao da ga održim.

- Odlično - reže Ajnštajn - Sada vam se pruža prilika da to i pokažete. Ja ću staviti vašu kapu na glavu i voziti kola, a vi se predstavite kao Albert Ajnštajn, jer me inače na ovom univerzitetu ne poznaju.

Šofer je besprekorno održao predavanje, ali kad je završio, jedan od slušalaca je postavio pitanje sa puno komplikovanih matematičkih formula. Šofer se brzo snažao i odgovorio:

- Čudi me da postavljate tako prosto pitanje na koje odgovor zna čak i moj šofer. Odmah ću ga pozvati da biste se i sami u to uverili.

- . -

- + - + -

REŠENJE MAGRADNOG ZADATKA

U osnovi, zadatak je jednostavan, ali zahteva određen trud oko numeričkog rešavanja. Rešenje zadataka zasniva se na relacijama:

1. Za Coulomb-ovsku interakciju privlačenja jona:

$$F_c = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} ; \quad U_c = - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^1} ;$$

$$K_c = - \left(\frac{\partial F_c}{\partial r} \right)_{r_0, r_0} = - \frac{2}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_0^3} .$$

U ovim relacijama $q_1 = q_2 = e$, gde je e nanelektrisanje elektrona a r_0 je ravnotežni razmak između jona u molekulu.

2. Za Born-Landé - ovu interakciju odbijanja jona

$$F_b = \frac{\lambda}{r^n} ; \quad U_b = \frac{\lambda}{(n-1) r^{n-1}} ;$$

$$K_b = \frac{n\lambda}{r_0^{n-1}} .$$

3. Za Van der Waals-ove dipol-dipol i kvadripol-dipol interakcije

$$U = U_{dd} + U_{qd}$$

$$U_{dd} = - \frac{C}{r^6} ; \quad F_{dd} = - \frac{6C}{r^7} ; \quad K_{dd} = - \frac{42C}{r_0^8}$$

$$U_{qd} = - \frac{d}{r^8} ; \quad F_{qd} = - \frac{8d}{r^9} ; \quad K_{qd} = - \frac{72d}{r^{10}}$$

a) Određivanje ravnotežnog razmaka

Ako se zanemare Van der Waals-ove interakcije, uslov

$$P_C + P_B = 0 \text{ daje } r = r_{01} .$$

Ako se uzmu u obzir i Van der Waals-ove interakcije,

$$\text{uslov } P_C + P_B + P_{dd} + P_{qd} = 0 \text{ daje } r = r_{02} .$$

Eksplicitni izrazi za pojedine sile traže primenu odgovarajućeg numeričkog postupka. Bez primene računara, zadatak se može rešiti grafičkom konstrukcijom. U priručnicima se mogu naći sledeće vrednosti za jonske radijuse.

$$r_{\text{Na}^+} = 0,98 \text{ \AA} \quad r_{\text{F}^-} = 1,33 \text{ \AA}$$

$$r_{\text{Cs}^+} = 1,65 \text{ \AA} \quad r_{\text{I}^-} = 2,20 \text{ \AA}$$

Što znači da probne vrednosti za r_0 leže za NaF oko $2,3 \text{ \AA}$ a za CsI oko $3,9 \text{ \AA}$.

Prvo se vrši račun za P_C i P_B :

za NaF u intervalu $1,5 \leq r \leq 3 \text{ \AA}$

za CsI u intervalu $2,5 \leq r \leq 5,5 \text{ \AA}$

U ovom slučaju jednostavan proračun daje

$$\text{za NaF} \quad r_{01} = 1,97 \text{ \AA}$$

$$\text{za CsI} \quad r_{01} = 3,24 \text{ \AA}$$

Izitim se računaju sile ($P_C + P_B$) i ($P_{dd} + P_{qd}$) - zbog malih vrednosti Van der Waals-ovih sile, račun se vrši

za NaF u intervalu $1,6 \leq r \leq r_{01}$

za CsI u intervalu $3,0 \leq r \leq r_{01}$

(privlačni karakter Van der Waals-ovih interakcija dozvoljava da se ograničimo na vrednosti $r \leq r_{01}$)

Grafičko predstavljanje $P_C + P_B = f(r)$ i $P_{dd} + P_{qd} = \gamma(r)$

daje

$$\text{za NaF} \quad r_{02} = 1,96 \text{ \AA}$$

$$\text{za CsI} \quad r_{02} = 3,16 \text{ \AA}$$

b) Proračun potencijalne energije molekula u uslovima ravnoteže

Primena izračunatih vrednosti r_{01} i r_{02} kao i vrednosti konstanta datih uslovima zadatka daje ($U = \sum U_i$) :

$$\text{za NaF: } U(r_{01}) = 6,57 \text{ eV} ; U(r_{02}) = 6,63 \text{ eV}$$

$$\text{za CsI: } U(r_{01}) = 4,00 \text{ eV} ; U(r_{02}) = 4,16 \text{ eV}$$

(Ove vrednosti odgovaraju vrednostima energije disocijacije procenjenim na osnovu Haber - Born - ovog ciklusa.)

c) Proračun konstante sile za međuatomске veze u posmatranim molekulama daje ($K = \sum K_i$) :

$$\text{za NaF: } K(r_{01}) = 2,71 \text{ N/cm} ; K(r_{02}) = 2,79 \text{ N/cm}$$

$$\text{za CsI: } K(r_{01}) = 0,61 \text{ N/cm} ; K(r_{02}) = 0,72 \text{ N/cm}$$

d) Karakteristična učestanost oscilovanja, koja odgovara proračunatoj konstanti veze, može se izračunati ako se primeni relacija $\omega^2 = 4\pi^2 K / \mu$

za harmonijski oscilator, gde u ovom slučaju μ predstavlja redukovani masu sistema.

Ako se iz priročnika uzmu podaci za atomske mase (m_i) jedna, koji ulaze u sastav molekula, i izraze u masenim atomskim jedinicama, moguće je odrediti odgovarajuće redukovane mase:

$$\mu = \frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2}$$

i izračunati tražene učestanosti.

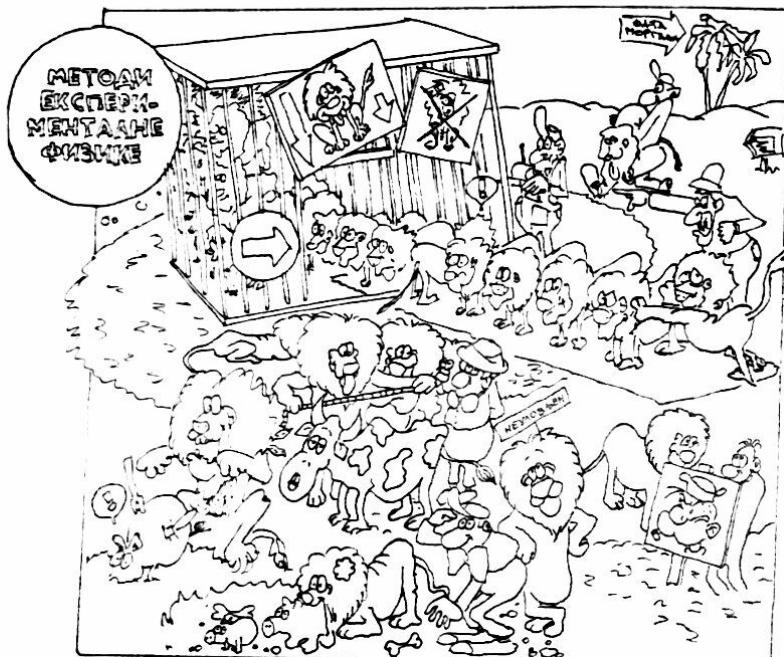
Račun daje

$$\text{za NaF: } \nu(r_{01}) = 2 \cdot 10^{13} \text{ Hz} ; \nu(r_{02}) = 2,03 \cdot 10^{13} \text{ Hz}$$

$$\text{za CsI: } \nu(r_{01}) = 0,38 \cdot 10^{13} \text{ Hz} ; \nu(r_{02}) = 0,41 \cdot 10^{13} \text{ Hz}$$

Račun pokazuje postojanje primetnog uticaja Van der Waals-ovih interakcija. Uticaj je izrazitiji kod CsI (što se moglo i očekivati - zašto ?).

Nagrađni zadatak i rešenje je dao prof. dr. M. Napijalo. Na adresu redakcije FIZIS-a je stiglo jedno delimično tačno rešenje nagradnog zadatka iz prošlog broja, Topalović Zorana, studenta IV godine fizike, prema tome, nagrada, ovog puta, se neće uručiti.



Crtiško-magnetski metod. Površina u obliku krovnog sočiva zasadi se "mačjom travom" (Napeta cattaria). U njenoj žili postavi se čelični kavez, ali se pri tome pazi da sočivasta površina ima pravac upravan na horizontalnu komponentu magnetskog polja Zemlje. Zatim se zasadi veća oblast u pustinji slatkim spanaćem (Spinacia oleracea), koji, kao što se zna, sadrži u sebi velike količine gvožđja. Pustinjski biljojed se najedu ovog spanaća. Saharski lavovi, opet, najedu se biljojeda koji su jeli spanać i, s obzirom na povećanu sadržinu gvožđja u telu, postaju orijentisani paralelno sa magnetskim poljem Zemlje. Sočivasta površina polja zasadjenog "mačjom travom" usmerava, zatim, kolonu lavova ka žili, u kojoj se nalazi kavez!

СУНЧЕВА ЕНЕРГИЈА

ОСНОВАЧКА СКУПШТИНА ДСЕ СРБИЈЕ

Dušan Filipović

Institut za fiziku, Beograd

Svet se, u to više niko ne sumnja, nalazi u periodu koji karakteriše ozbiljna energetska kriza. S jedne strane eksponencijalni rast potreba uslovljen industrijskom i tehnološkom revolucijom, a s druge ipak konačne rezerve konvencionalnih izvora energije, uglja i naftе, uticale su da se zadnjih godina razvije svest o neophodnosti racionalnijeg korišćenja postojećih i pronaalaženja novih izvora energije.

U našoj zemlji postoje povoljni geografski i klimatski uslovi za korišćenje sunčeve energije, svakako najperspektivnijeg nekonvencionalnog izvora. Sa nešto više od 10% sunčevog zračenja koje stiže do površine zemlje (90% se raseje ili apsorbuje u atmosferi), Jugoslavija spada u najosunčanije zemlje Evrope. SR Srbija, u jugoslovenskim okvirima, ima sasvim zadovoljavajuću osunčanost od 2,5 do 3 solarnih konstanti na dan. Solarna konstanta iznosi $1,342 \text{ KWh/m}^2$ i predstavlja maksimalnu energiju koja pada u jedinici vremena na jedinicu površine zemlje.

Organizovana akcija na planu korišćenja sunčeve energije započeta je u nas osnivanjem JUSE (Jugoslovensko udruženje za sunčevu energiju). Sem toga, više republičkih zajednica za nauku pokrenulo je odgovarajuće projekte, a dugačak je spisak instituta i radnih organizacija koje se sunčevu energetiku uključile u svoje razvojne programe.

Saradnja nauke i privrede u ovoj oblasti mogla bi da najbolje ukaže na puteve kojima u tom pravcu treba dalje ići.

Shvatajući neophodnost široke akcije za korišćenje nekonvencionalnih izvora energije, pre svega sunčeve, ali i drugih gde za to postoje uslovi (vetar, geotermalna energija, energija organskih materija), u Beogradu je marta ove godine grupa naučnih radnika i privrednika uz podršku Društva inženjera i tehničara, sazvala osnivačku skupštinu Društva za sunčevu energiju Srbije.

Na Skupštini je o ciljevima i zadacima Društva govorio Dr. Miha Cerineo iz Instituta za fiziku Univerziteta u Beogradu. Društvo je zamišljeno kao stručna i društvena organizacija sa ciljem da razvija, unapređuje, popularizuje i omasovljuje korišćenje sunčeve energije i drugih nekonvencionalnih i obnovljivih izvora energije. Time se čuva i unapređuje čovekova životna i radna sredina, podiže nivo opšte tehničke kulture i konačno popravlja energetski bilans kako SR Srbije tako i cele naše socijalističke i samoupravne zajednice.

Zainteresovani u mestima SR Srbije biće organizovani u Podružnice Društva koje će na delegatskim osnovama činiti integralni deo JUSE.

Na Skupštini je izabrano Izvršno veće od eminentnih stručnjaka sa Univerziteta, iz instituta i privrede.

Za predsednika Društva izabran je Prof. Dr. Zoran Zarić, kandidat za akademika SANU.

Konačno, šta student fizike ili meteorologije može da očekuje od članstva u Društvu za sunčevu energiju Srbije? U fazi u kojoj se sada nalazi najtačnije bi bilo reći da član dobija onoliko koliko je spreman da sam da.

Mogućnosti su velike. Počev od poslediplomskih studija u oblasti Sunčeva energija na Elektrotehničkom fakultetu beogradskog univerziteta ka čemu se još kao student može da usmerava aktivnim učešćem u radu Društva, preko upoznavanja na izvorištu sa problemima i dostignućima u neposrednom kontaktu sa ljudima koji se time bave, do angažovanja na kvalifikovanoj popularizaciji korišćenja sunčeve i drugih nekonvencionalnih izvora energije.

Problematika je tako široka da praktično svaki student fizike ili meteorologije može naći polje rada u skladu sa ličnim interesovanjem.

S A D R Ž A J

L.Rak : Iz istorije fizike (ideje i zablude)	1
Kako je nastala teorija relativnosti ?	
T.A.Brody i dr.: Kvantna mehanika i njene	10
interpretacije	
C.M.Stickley: Laserska fuzija	21
K.D.Mermin, D.M. Lee: Superfluid helijum 3	28
S.V.Hoking: Kvantna mehanika crnih rupa	41
M.B.Stearns: Zašto je gvoždje magnetično?	45
Erih fon Petko vam predstavlja (Kamadjoza):	61
Aristotelo-Njutn	
Rešenje nagradnog zadatka	65
D.Filipović: Sunčeva energija, Osnivačka skup-	69
ština DSE Srbije	